

Bachelorarbeit



Studiengang:

Augenoptik und Hörakustik

THEMA: Identifikation und Charakterisierung von reproduzierbaren Impulsschallquellen

Autor: Luisa Klein (27781)
geboren am 20.06. 1987 in Neuendettelsau

Eingereicht: am 03.11.2011

Korrektor: Prof. Dr. Eckhard Hoffmann

Inhaltsverzeichnis

I.	Abbildungsverzeichnis	5
II.	Tabellenverzeichnis.....	10
III.	Abkürzungen	11
IV.	Formelzeichen	11
1	Abstract	12
1	Einleitung	13
2	Allgemeines.....	14
2.1	Definition Knall.....	14
2.2	Lärmvibrationsarbeitsschutzverordnung	18
2.3	Methodik der Knallmessungen: American National Standard: Methods for Measurement of Impulse Noise (ANSI S12.7)	18
2.3.1	Messarten	19
2.3.2	Eigenschaften und Anforderungen an die Messung.....	20
2.3.3	Festlegung der Messsystem- Eigenschaften.....	21
2.3.4	Allgemeines zu den Messungen	22
3	Material und Methode	23
4.1	Das Messsystem.....	23
4.2	Das Programm LabVIEW und Set Up	24
4.2.1	Schalldruckmessung.....	26
4.2.2	Trigger.....	27
4.2.3	Filter	28
4.2.4	UFF58 Datei	30
4.2.5	Sampling Rate	31
4.3	Das Mikrofon	31
4.4	Referenzquellen.....	32
4.4.1	Vorstellung der einzelnen Knallquellen	33

4	Ergebnisse	36
4.1	Der Spitzenpegel.....	37
5.1.1	Klappe schwarz	37
4.1.2	Klappe hell	40
4.1.3	Klicker	44
4.1.4	Spielzeugpistolen	48
4.1.5	Schreckschusspistole	53
4.2	C- Duration	55
5.2.1	Klappe schwarz	55
5.2.2	Klappe hell	57
4.2.3	Klicker	58
4.2.4	Spielzeugpistole	60
4.2.5	Schreckschusspistole	63
4.3	Frequenzanalyse	65
4.3.3	Klappe schwarz	65
4.3.2	Klappe hell	66
4.3.3	Klicker	66
4.3.4	Spielzeugpistole	68
4.3.5	Schreckschusspistole	70
5	Diskussion	71
5.1	Der Spitzenpegel.....	71
5.1.1	Klappe schwarz vs. Klappe hell	71
5.1.2	Klicker schwarz und Schreckschusspistole	73
5.1.3	Die Spielzeugpistolen.....	75
5.2	Die Wirkzeit (C- Duration).....	76
6.2.1	Klappe schwarz vs. Klappe hell	76
6.2.2	Klicker schwarz und Schreckschusspistole	77

5.2.1	Die Spielzeugpistolen.....	79
5.3	Die Frequenzanalyse.....	80
6.3.1	Klappe schwarz vs. Klappe hell	80
5.3.2	Klicker schwarz und Schreckschusspistole.....	80
5.3.3	Spielzeugpistolen	80
5.3.4	Zusammenhang Frequencharakteristik mit Spitzenpegel und C-Duration	81
6	Fazit.....	83
7	Literaturverzeichnis.....	84
8	schriftliche Erklärung	86

I. Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Druck-Zeit Verlauf eines Knalles, Quelle: Brinkmann (Pfander 1994).....	14
Abb. 2: Auswirkung einer Reflexion im Druck-Zeit-Diagramm; Quelle: Brinkmann (Pfander 1994).....	15
Abb. 3: Wirkzeitbestimmung in Abhängigkeit vom Spitzendruck, Quelle: Brinkmann (Pfander 1994).....	16
Abb. 4: Idealisierte Wellenform eines Knalles, Quelle: Brinkmann (Pfander 1994).....	17
Abb. 5: Idealisierte Wellenform von Impuls-Lärm, Quelle Brinkmann (Pfander 1994).....	17
Abb. 6: Messraum	23
Abb. 7: Messsystem National Instruments.....	23
Abb. 8: Programmablauf	24
Abb. 9: Vereinfachte Darstellung Programmablauf.....	25
Abb. 10: LabVIEW Messergebnisse	25
Abb. 11: Terzanalyse.....	26
Abb. 12: Datenansicht des Signals , Spielzeugpistole (getriggerte Daten vs. Bessel)	29
Abb. 13: Datenansicht eines Signals, Klappe hell (getriggerte Daten vs. Bessel).....	30
Abb. 14: Das Messmikrofon	31
Abb. 15: Klappe schwarz	33
Abb. 17: Klicker.....	34
Abb. 16: Klappe hell	34
Abb. 18: Spielzeugpistole, Munition USA.....	35
Abb. 19: Spielzeugpistole R8, Munition Deutschland.....	35
Abb. 20: Spielzeugpistole R8, Munition USA.....	35
Abb. 21: Schreckschusspistole 9 mm.....	35
Abb. 22: Mikrofonausrichtung : 0 Grad.....	36
Abb. 23: Mikrofonausrichtung: 90 Grad.....	36

Abb. 24: Mikrofonausrichtung: 180 Grad.....	36
Abb. 25: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz, 1m 0 Grad.....	37
Abb. 26: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz, 1m 90 Grad....	38
Abb. 27: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz, 1m 180 Grad..	38
Abb. 28: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz, 50cm 0 Grad..	39
Abb. 29: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz, 50cm 90 Grad	39
Abb. 30: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz, 50 cm 180 Grad	40
Abb. 31: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe hell, 1m 0 Grad.....	41
Abb. 32: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe hell, 1m 90 Grad.....	41
Abb. 33: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe hell, 1m 180 Grad.....	42
Abb. 34: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe hell, 50 cm 0 Grad	42
Abb. 35: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe hell 50 cm 90 Grad	43
Abb. 36: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe hell 50 cm 180 Grad	43
Abb. 38: Klicker, Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, 25 cm 90 Grad	44
Abb. 39: Klicker, Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, 25 cm 180 Grad	45
Abb. 40: Klicker, Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, 50 cm 0 Grad	45
Abb. 41: Klicker, Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, 50 cm 90 Grad	46
Abb. 42: Klicker, Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, 50 cm, 180 Grad	46
Abb. 43: Klicker, Mittelwerte der Standardabweichung.....	47
Abb. 44: Mittelwerte der Spitzenpegel des schwarzen Klickers bei viermaliger Messwiederholung	47
Abb. 45: Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, R8, Munition USA, 50 cm	49

Abb. 46: Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, R8, Munition Dtl., 50 cm	49
Abbildung 47: Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Rocky, 50 cm.....	50
Abb. 48: Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, R8, Munition USA, 1m.....	50
Abb. 49: Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, R8, Munition Dtl., 1m.....	51
Abb. 50: Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Rocky, 1m.....	51
Abb. 51: Spitzenpegel bei fünfmaliger Messwiederholung, Schreckschusspistole, 2m, 0 Grad	53
Abb. 52: Spitzenpegel bei fünfmaliger Messwiederholung, Schreckschusspistole, 2m, 90 Grad	53
Abb. 53: Spitzenpegel bei fünfmaliger Messwiederholung, Schreckschusspistole, 4m, 0 Grad	54
Abb. 54: Spitzenpegel bei fünfmaliger Messwiederholung, Schreckschusspistole, 4m, 90 Grad	54
Abb. 55: Mittelwerte der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz...	55
Abb. 56: Standardabweichung der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz.....	56
Abb. 57: Mittelwerte der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Klappe hell	57
Abb. 58: Standardabweichung der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Klappe hell	57
Abb. 59: Mittelwerte der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Klicker schwarz ..	58
Abb. 60: Standardabweichung der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Klicker schwarz.....	59
Abb. 61: Mittelwerte der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Spielzeugpistole R8, Dtl.....	60

Abb. 62: Mittelwerte der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Spielzeugpistole Rocky	60
Abb. 63: Mittelwerte der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Spielzeugpistole R8, USA.....	61
Abb. 64: Standardabweichung der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Spielzeugpistole R8, Dtl.....	62
Abb. 65: Standardabweichung der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Spielzeugpistole Rocky	62
Abb. 66: Standardabweichung der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Spielzeugpistole R8, USA.....	63
Abb. 67: Mittelwerte der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Schreckschusspistole	63
Abb. 68: Standardabweichung der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Schreckschusspistole	64
Abb. 69: Terzanalyse Klappe Schwarz	65
Abb. 70: Terzanalyse Klappe hell	66
Abb. 71: Terzanalyse Klicker Schwarz.....	66
Abb. 72: Terzanalyse Klicker gelb.....	67
Abb. 73: Terzanalyse Klicker schwarzrot	67
Abb. 74: Terzanalyse Klicker weiß.....	68
Abb. 75: Terzanalyse Spielzeugpistole R8, Dtl.	68
Abb. 77: Terzanalyse Spielzeugpistole R8, USA.....	69
Abb. 76: Terzanalyse Spielzeugpistole Rocky	69
Abb. 78: Standardabweichungen Spitzenpegel, Klappe schwarz vs. Klappe hell	71
Abb. 79: Klicker schwarz, Standardabweichung Spitzenpegel.....	73
Abb. 80: Schreckschusspistole, Standardabweichung Spitzenpegel.....	74
Abb. 81: Spielzeugpistolen, Standardabweichung Spitzenpegel	75
Abb. 82: Klappe schwarz vs. Klappe hell, Standardabweichung.....	76

Abb. 83: Klicker Schwarz, Standardabweichung C-Duration	77
Abb. 84: Schreckschusspistole, Standardabweichung C-Duration	78
Abb. 85: Spielzeugpistole, Standardabweichung C- Duration.....	79

II. Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: LärmVibrationsArbSchV 2007: obere und untere Auslösewerte	18
Tabelle 2: Trigger Parameter.....	27
Tabelle 3: Filter Parameter	28
Tabelle 4: Mikrofoneigenschaften	31
Tabelle 5: Werte der Spitzenpegel aller Klickermodelle in den verschiedenen Abständen und Einfallswinkeln.....	48
Tabelle 6: Werte der Spitzenpegel der Spielzeugpistolen in allen verschiedenen Abständen und Einfallswinkeln.....	52
Tabelle 7: Mittelwert aller Mittelwerte der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz vs. Klappe hell	72
Tabelle 8: Mittelwert der Mittelwerte der Spitze	74
Tabelle 9: Mittelwert aller Mittelwerte der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Spielzeugpistolen	75
Tabelle 10: Mittelwert aller Mittelwerte nach viermaliger Messwiederholung der C-Duration, Klappe schwarz vs. Klappe hell	77
Tabelle 11: Mittelwert aller Mittelwerte der C-Duration nach viermaliger Messwiederholung, Klicker schwarz und Schreckschusspistole.....	78
Tabelle 12: Mittelwert aller Mittelwerte der C-Duration nach viermaliger Messwiederholung, Spielzeugpistolen	79
Tabelle 13: Überblick aller Ergebnisse, Zusammenhang Spitzenpegel, C-Duration und Frequenzcharakteristik	81
Tabelle 14: Überblick aller reproduzierbaren Referenzquellen	83

III. Abkürzungen

vgl.	vergleiche
m	Milli 10^{-3}
μ	Mikro 10^{-6}
k	Kilo 10^3
L _p	Schalldruckpegel
P _A	Atmosphärendruck
P _r	Reflexion
t _w	Wirkzeit
L _{peak}	Spitzenpegel
L _{C peak}	C bewerteter Spitzenpegel
L _{AI Max}	maximale zeit- und frequenzbewertete Schalldruckpegel

IV. Formelzeichen

Formelzeichen	Größe	Einheit
p	Schalldruck	Pa oder dB
t	Zeit	Sekunden
f	Frequenz	Hertz

1 Abstract

Im Rahmen des Dosimeterprojektes befasst sich diese Bachelorarbeit damit, geeignete Impulsschallquellen zu identifizieren, die reproduzierbare Testsignale mit unterschiedlicher Pegel- und Zeitcharakteristik liefern.

Beim Messsystem handelt es sich um ein Gerät der Firma National Instruments und die Knallmessungen für diese Arbeit wurden mit dem von der Firma National Instruments entwickelten Softwaresystem LabVIEW durchgeführt. Das Softwaresystem erfasst die Charakteristika des Knalls mit Anstiegsflanke und Wirkzeit sowie Peaklevel und Frequenzcharakteristik, welches entscheidende Parameter für die Bewertung der Knalle sind und in Zukunft für das Dosimeterprojekt entscheidend für das Ausmaß der zu beobachteten Schäden und ermöglicht somit Information über den täglichen Impuls- Zeitverlauf.

Im Vorfeld wurde ein Knall im Idealfall als reproduzierbar definiert mit einer Abweichung von ± 1 dB in Bezug auf den Spitzenschalldruckpegel. Jede Referenzquelle wurde in verschiedenen Abständen und Einfallswinkeln zum Mikrofon jeweils vier Mal gemessen. Nach einigen Messungen verschiedener Knallquellen stellten sich folgende als „am reproduzierbarsten“ heraus:

- Die **schwarze Klappe** mit einem Mittelwert aller Standardabweichungen von **0,20**
- Die **helle Klappe** mit einem Mittelwert aller Standardabweichungen von **0,23**
- Der **schwarze Klicker** mit einem Mittelwert aller Standardabweichungen von **0,29**
- Die **Schreckschusspistole** mit einem Mittelwert aller Standardabweichungen von **0,60**

Dieses sehr gute Ergebnis in Bezug auf die Reproduzierbarkeit der Knallquellen lässt sich damit erklären, dass beide Referenzquellen aufgrund ihrer vorgegebenen, nichtveränderbaren Konstruktion bei Betätigung knallen und dabei ein konstantes Ergebnis der entscheidenden Parameter liefern. Allerdings bringt jede Referenzquelle auch eine Schwierigkeit bei der Messung mit, die beachtet werden muss.

Die Messergebnisse in dieser Bachelorarbeit sind repräsentativ und erfüllen die Bedingungen einer reproduzierbaren Knallquelle und somit wurden vier Referenzquellen identifiziert, die im Rahmen des Dosimeterprojektes geeignet sind.

1 Einleitung

Lärm gefährdet die Gesundheit. Erhebliche Hörschädigungen, sowie psychische Schäden und soziale Folgen können die Auswirkung von einer jahrelangen Lärmexposition sein. Doch nicht nur eine jahrelange Lärmexposition, schon ein kurzer hochpegeliger Schallimpuls kann nach einmaligem Auftreten irreversible Innenohrschäden hervorrufen. Besonders gefährlich sind hierbei Knalle, extrem hohe Schalldruckpegel, wie Silvesterböller, Waffen ect. Diese können innerhalb von Millisekunden eine mechanische Zerstörung der Haarzellen hervorrufen. Oft sind die Folgen Hörverluste im hochfrequenten Bereich um 4 kHz (Liedtke 2010).

Die Lärm- und Vibrations- Arbeitsschutzverordnung (LärmVibrationsArbSchV, 2007) gibt Werte für die zulässige Exposition gegenüber Lärm am Arbeitsplatz vor (vgl 3.2). Im Gegensatz zum Lärm am Arbeitsplatz lässt sich für den Alltag und die Freizeit keine Verordnung definieren, da bis heute keine ausreichenden Studien über die tägliche Impulsaussetzung veröffentlicht wurden. Genau an dieser Schnittstelle möchte eine Arbeitsgruppe der Hochschule Furtwangen unter der Leitung von Prof. Dr. Dirk Benyoucef, Prof. Dr. Ulrich Mescheder, sowie der Hochschule Aalen unter der Leitung von Prof. Dr. med. Eckhard Hoffmann ansetzen und hat folgendes Vorhaben:

Ziel des Projektes ist die Entwicklung eines neuartigen miniaturisierten Hochpegel Impuls-Mikrofon- Systems mit Signalverarbeitungseinheit und die Untersuchung von Impulslärm induzierter Gehörschädigung bei Menschen. Dieses Sensorsystem soll von einer großen Probandengruppe über einen längeren Zeitraum in Ohrnähe oder sogar im Ohr getragen werden und sehr schnelle Anstiegszeiten (im Bereich weniger μs) und große Lärmpegel (bis 170 dB) erfassen. Es soll mehr Information über den täglichen Impulspegel – Zeitverlauf ermöglichen. Die Schall- Impuls- Belastungen werden erfasst und die Schädigungen werden medizinisch untersucht.

Um Knalle richtig bewerten zu können, müssen Schallimpulse mit Peak und Zeitstruktur erfasst werden. Die Charakteristika des Knalls mit Anstiegsflanke und Wirkzeit sowie Peaklevel sind entscheidende Parameter für das Ausmaß der zu beobachteten Schäden (Benyoucef et al.). Für dieses Projekt ist es notwendig geeignete Impulsschallquellen zu identifizieren, die reproduzierbare Testsignale mit unterschiedlicher Pegel- und Zeitcharakteristik liefern. Die folgende Arbeit beschäftigt sich mit der Frage, ob eine reproduzierbare Referenzquelle hoher Schalldruckpegel zu definieren ist.

2 Allgemeines

2.1 Definition Knall

„Der Knall ist ein zweiseitiger Schallimpuls von vornehmlich großer Stärke und äußerst kurzem Zeitintervall“ (Pfander 1994, S. 49).

Die folgenden Erläuterungen orientieren sich stark an die Aufzeichnungen von Heinz Brinkmann (aus Pfander 1994). Knall ist ein physikalisches Phänomen und ist daher in den Bereich der Strömungslehre, Gasdynamik und Verdichtungsstöße einzuordnen. Dennoch sind die Auswirkungen eines Knalls auf das menschliche Ohr ein klares akustisches Problem.

Folgende messbare Knallkenngrößen sind bei der Beurteilung einer möglichen Hörschädigung von Bedeutung: der Spitzendruck, die Anstiegszeit/ der Zeitverlauf und die Wirkzeit.

1. Der Spitzendruck

Um einen Knall physikalisch beurteilen zu können, benötigt man seinen Druck-Zeit-Verlauf in einem Kartesischem Koordinatensystem. Dort wird der Druck auf der y-Achse und die Zeit auf der x-Achse aufgetragen.

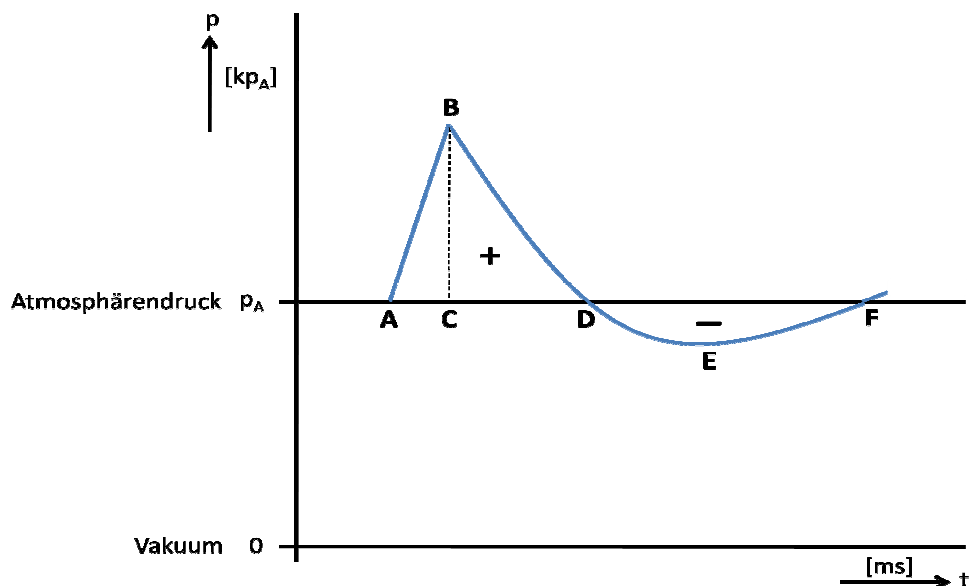


Abb. 1: Druck-Zeit Verlauf eines Knalles, Quelle: Brinkmann (Pfander 1994)

Auszugehen ist vom statischen Gleichdruck p_A = Luftdruck am Messort (Atmosphärendruck).

- A: Beginn des Überdrucks
- B: Höchstwert, der als Spitzenwert B in Pa oder kPa gemessen wird und welcher in der Zeit A – C erreicht wird.
- C: Zeitpunkt des erreichten Spitzenwertes p
- D: Ende der positiven Phase. Der exponentielle Abfall vom Spitzenwert (Punkt B) zum Druck p_A (Punkt D) ist viel langsamer als der steile Anstieg von Punkt A zum Spitzenwert (Punkt B)
- D-F: negative Phase
- E: Unterdruck mit der größten Amplitude
- F: Wert des Luftdrucks p_A am Messort wieder erreicht

Der negative Anteil kann maximal bis zum Nullwert bzw. Vakuum führen.

Betrachtet werden sollen Knalle, die möglicherweise Hörschädigungen verursachen. Charakteristisch für diese Knalle ist, dass der positive Anteil ($p_A + p$) viel größer als der negative Anteil ($p_A - p$) ist, wie in Abbildung 1 dargestellt ist.

In der Realität tritt allerdings nicht der idealisierte Knalldruckverlauf auf. Reflexionen, zum Beispiel an Wänden, wirken sich entscheidend auf die Beurteilung des Knalldruckverlaufs und damit des Spitzendrucks aus.

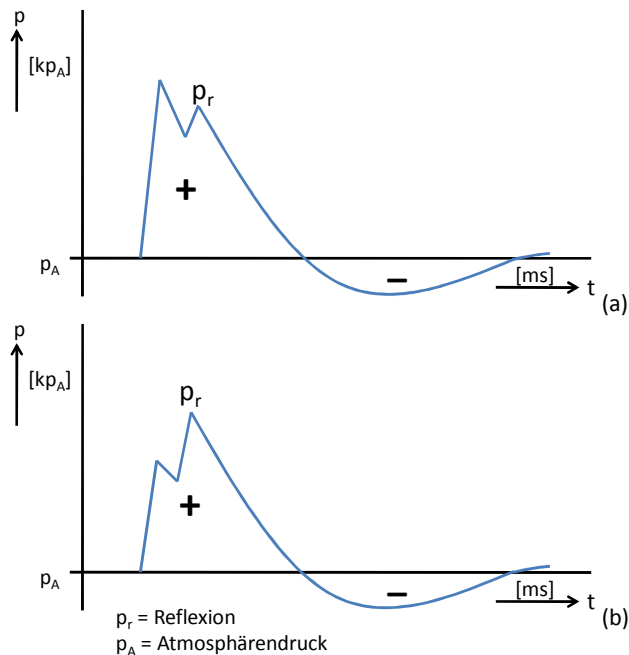


Abb. 2: Auswirkung einer Reflexion im Druck-Zeit-Diagramm; Quelle: Brinkmann (Pfander 1994)

2. Anstiegszeit/ Zeitverlauf

Charakteristisch für den Knall ist der Druckanstieg in einer Stoßwelle, welche eine natürliche Steilheit besitzt. Dieser steile Druckanstieg ist für die Ursache einer Hörschädigung entscheidend.

Die Anstiegszeit ist abhängig von der Stoßwelle. Je schwächer die Stoßwelle und somit der Spitzendruck, desto länger die Anstiegszeit und weniger steil die Anstiegsflanke.

Brinkmann, welcher sich ausführlich und hauptsächlich mit den Knallen von Waffen beschäftigt hat, hat die Zeit der positiven Phase (A –D) zwischen 0,1 und 5,0 ms und kürzer als die Zeit der negativen Phase (D - F) festgelegt.

3. Wirkzeit

Grundsätzlich werden 3 Wirkdauern unterschieden: die A-, B-, und C- Duration (Wirkzeit). In Deutschland findet man die Wirkzeit nach Pfander oder C-Duration genannt, auch die derzeitigen Gehörschutzrichtlinien der deutschen Bundeswehr basieren darauf (digitale Erfassung und Auswertung von Impuslärmm, 1995). Diese wird in Abhängigkeit vom Spitzendruck bestimmt und die Teilzeiten im positiven und negativen Bereich addiert. Die Zeitspanne der Wirkzeit beträgt -10 dB vor Maximum bis -10 dB nach dem Maximum. Somit ist die Wirkzeit wie folgt definiert:

$$t_w = A-D + C-D + E-F$$

In der folgenden Abbildung ist die Bestimmung der Wirkzeit graphisch dargestellt:

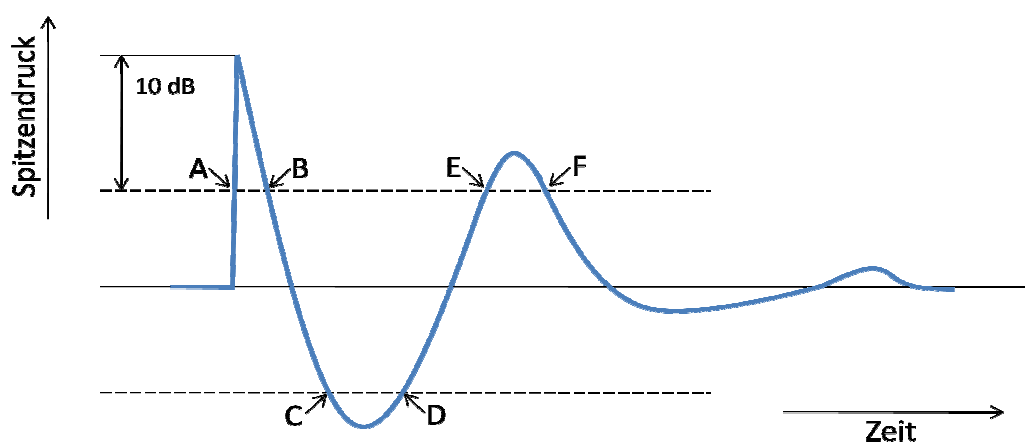


Abb. 3: Wirkzeitbestimmung in Abhängigkeit vom Spitzendruck, Quelle: Brinkmann (Pfander 1994)

In der Literatur findet man außerdem die anglo-amerikanische Wirkzeitdefinition, wie sie für die Anwendung der CHABA-Grenzkriterien erforderlich sind (Ward, 1968). In dieser Definition wird die Wirkzeit in „A-Zeit“ und „B-Zeit“ unterteilt.

In der folgenden Abbildung ist die idealisierte oszilloskopische Wellenform eines Knalls dargestellt.

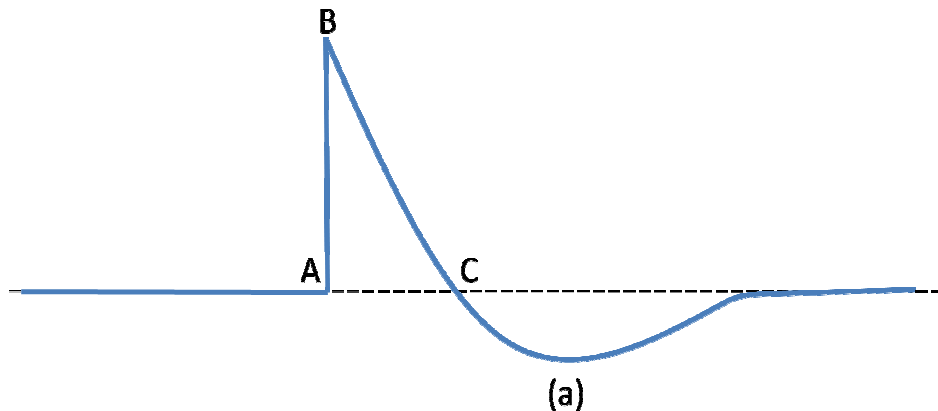


Abb. 4: Idealisierte Wellenform eines Knalles, Quelle: Brinkmann (Pfander 1994)

- a) Die A-Zeit : Die A-Zeit stellt die Zeitdifferenz vom Punkt A nach C dar, sprich vom Beginn des Knalls bis zum ersten Nulldurchgang nach Abfall des Spitzendrucks. Diese Zeit bestimmt das Maximum der Energie im Knallspektrum, dennoch wird die Einwirkzeit bei komplizierten Schalldruckverläufen mit Reflexionen nach dem Nulldurchgang nicht berücksichtigt.

In der folgenden Abbildung ist die idealisierte Wellenform von Impuls-Lärm dargestellt.

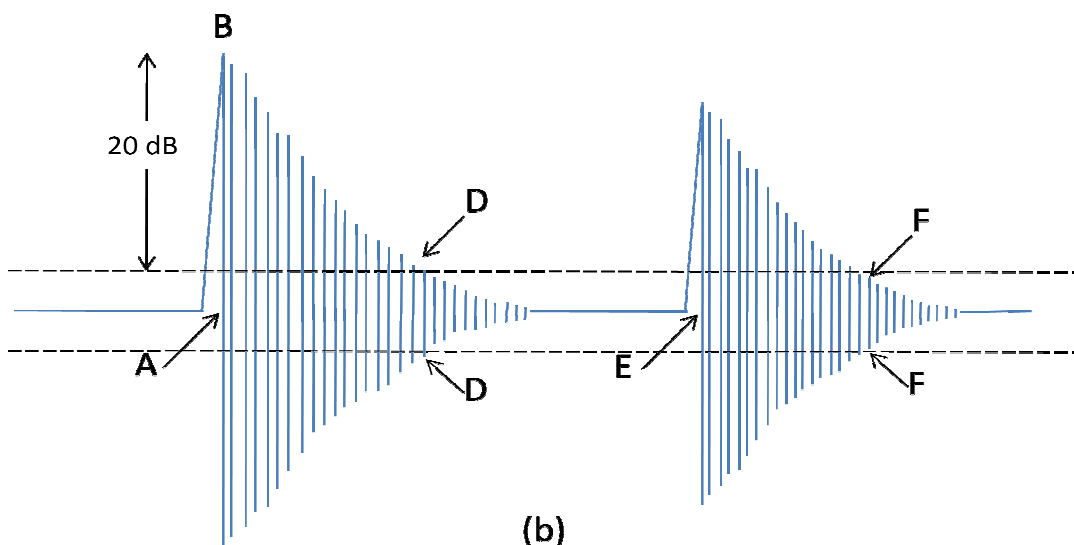


Abb. 5: Idealisierte Wellenform von Impuls-Lärm, Quelle Brinkmann (Pfander 1994)

- b) Die B-Zeit: Die B-Zeit stellt die Zeitdifferenz von Punkt A nach D, bzw. von E nach F (wenn eine Reflexion vorhanden ist) dar. Symmetrisch um das Druck-Zeit-Diagramm sind Einhüllende gezogen und die Wirkzeit ist definiert als die Zeit von -20 dB vor Maximum des Spitzendrucks bis -20 dB nach Maximum.

2.2 Lärmvibrationsarbeitsschutzverordnung

Die Lärmvibrationsarbeitsschutzverordnung gibt untere Auslösewerte und obere Auslösewerte für die zulässige Exposition gegenüber Lärm am Arbeitsplatz vor. Die oberen Auslösewerte bilden gleichzeitig die Grenzwerte für die Lärmexposition.

Tabelle 1: LärmVibrationsArbSchV 2007: obere und untere Auslösewerte

	L EX, 8h/ dB (A)	L pC, peak/ dB (C)
Obere Auslösewerte	85 dB	137 dB
Untere Auslösewerte	80 dB	135 dB

Als untere Auslösewerte sind ein Tagesexpositionspegel von 80 dB (A) und ein Spitzenschalldruckpegel von 135 dB (C) festgelegt.

Als obere Auslösewerte wurden ein Tagesexpositionspegel von 85 dB (A) und ein Spitzenschalldruckpegel von 135 dB (C) festgelegt (LärmVibrationsArbSchV 2007).

2.3 Methodik der Knallmessungen: American National Standard: Methods for Measurement of Impulse Noise (ANSI S12.7)

Das American National Standard Institute beschreibt in seiner Norm die Methoden von Knallmessungen und die Ergebnispräsentation. Diese Norm entstand 2006 und zeigt derzeit den aktuellen wissenschaftlichen Stand. Die Messungen dieses Projektes orientieren sich an den Inhalt dieser Norm.

Neben ANSI gibt es eine deutsch-französische Messvorschrift (Vorschriften und Richtlinien zur Registrierung und Auswertung von Waffenknallen, Deutsch- Französische Meßvorschrift

für Waffenknallmessungen 1995), welche das Messen von Stoßwellen auf nationaler und internationaler Ebene vereinheitlicht. Bei der Vereinbarung wurden folgende wichtige Punkte festgelegt: „

- Durchmesser des Druckaufnehmers einschließlich Sonde $\leq 5,5\text{ mm}$
- Freie Länge der Sonde (bei einem Durchmesser von 5,5 mm) = 80 mm
- Elektrische Filterung mit einem Tiefpassfilter mit der Grenzfrequenz = 22,4 kHz (Durchlass der tiefen Frequenzen, Beschneidung der Frequenzen oberhalb 22,4 kHz/ Bessel- Charakteristik)“ (Pfander 1994, Seite 71).

Bei dieser Vereinbarung handelt es sich allerdings ausschließlich um die Messung und Vereinheitlichung von Waffenknallen. Sie entstand 1978 und wurde 1994 überarbeitet, aber hinsichtlich der Aufnehmer- und Filtereigenschaften nicht mehr geändert.

2.3.1 Messarten

Es werden nach ANSI zwei Messmethodiken unterschieden. Einmal das Messen der charakteristischen Parameter des Knalls, wie Spitzenschalldruck und Dauer, welche direkt die Abweichung des augenblicklichen Schalldrucks nach Zeit angeben. Zum anderen, Messungen der zeit-integrierten Größen, wie frequenzbewerteter Expositionspegel. Bei den Messungen dieser Arbeit werden beide Methodiken gleichzeitig durchgeführt. Zeit-integrierte Größen werden mit Hilfe der Terzanalyse (siehe Punkt 4.2) festgestellt. Charakteristische Parameter, die zur Beschreibung eines Knalls in Betracht gezogen werden, sind Spitzenpegel (L_{peak}), L_{AImax} , LC_{peak} , A- Duration, C-Duration. Liedtke beschreibt in seinem Bericht „Akute Gehörschäden durch extrem hohe Schalldruckpegel“ Kennwerte zur Knallcharakteristik. Um eine möglicherweise unmittelbar gehörschädigende Lärmeinwirkung durch extrem hohe Schalldruckpegel zu beurteilen, ist der maximale „I“- bewertete Schalldruckpegel L_{AImax} heranzuziehen. L_{AImax} ist der maximale A und I bewertete Schalldruckpegel. Die A- Bewertung ist eine Frequenzbewertung und die I- Bewertung (I für Impuls) ist eine Zeitbewertung, die für den Schalldruckanstieg eine Zeitkonstante von 35 ms und für den Schalldruckabfall eine Zeitkonstante von 1,5s aufweist. L_{peak} ist der Spitzenwert des Schalldruckpegels und LC_{peak} ist der C-bewertete Spitzenwert, wobei die C-Bewertung eine weitere Frequenzbewertung ist. Die gehörschädigende Lärmeinwirkung wird also mit L_{AImax} beurteilt (Liedtke, HNO 2010). Ein einmaliges Schallereignis von mehr als $L_{\text{AImax}} = 135\text{ dB}$ entspricht etwa dem Wertebereich von 150-165 dB (C, peak) und kann akute Gehörschäden hervorrufen (Verein deutscher Ingenieure 1988). Laut Liedtke sind nach derzeitigem Erkenntnisstand Gehörschäden erst ab 150-

160 dB (C, peak) zu beobachten, obwohl laut Literatur und LärmVibrationsArbSchV 137 dB (C, peak) als Auslöseschwelle für Maßnahmen zur Prävention gelten.

2.3.2 Eigenschaften und Anforderungen an die Messung

Folgende Parameter sind für die Messung zeit-veränderlicher Größen, sowie zeit- integrierter Größen erforderlich:

- System Rise Time (Anstiegszeit)
Die Anstiegszeit sollte weniger als ein Zehntel der Anstiegszeit des Impulsschalls betragen.
- Overshoot (= „one hundred times the ratio of the maximum output of the measurement system to the idealized final output in response to a step function input” (ANSI S12.7)
Dieser sollte weniger als 5% sein.
- Droop (= „Amount multiplied by 100 by which the system output drops below the ideal final output in response to a step- function input, divided by the ideal final output” ANSI S12.7)
Dieser sollte weniger als 5% sein.
- Dynamic Range (Dynamikbereich)
Der Dynamikbereich sollte mindestens das Intervall 1 dB über dem Spitzenschalldruck bis 5 dB unter dem geringsten Schalldruck des Schwingungsverlaufs einschließen.
- Bandwidth (Bandbreite)
Die Bandbreite sollte den Frequenzbereich von einer Dekade unter der niedrigsten und einer Dekade über der höchsten entsprechenden Frequenz einschließen.

Für die Messung zeit- integrierter Größen sind neben den oben genannten Parametern noch folgende erforderlich:

- Sound Exposure Level Integration (Schallexpositionspegel- Integration)
Das Analoges des momentanen, quadrierten Schalldruck soll über die Impulsdauer integriert sein. Die Dauer der Integrationsperiode soll innerhalb +/- 5 % sein.
- Integration to Obtain Time- Average Sound Pressure Level (Integration zur Erreichung einer Durchschnittszeit des Schalldruckpegels)
Das Analoges des momentanen, quadrierten Schalldruck soll binnen einer festen Zeit integriert sein. Die Integrationszeit soll mit einer Genauigkeit von +/- 5% bestimmt sein.
- Digital Integration (Digitalintegration)

Die Abtastrate soll mindestens 2,5 mal die höchste, betrachtete Frequenz sein.

- Integrator Dynamic Range and Resolution (Integration Dynamikbereich und Auflösung)
Der Dynamikbereich soll mindestens 25 dB sein plus 10mal der gemeinsame Logarithmus des Verhältnisses der Integrationsperiode zur Signaldauer. Die Auflösung soll 0.5 dB oder weniger für entweder digitale oder analoge Integration sein.
- Frequency Weighting (Frequenzgewichtung)
Oktav- und Terzbandfilter sollen die „CLASS II und Class III“- Anforderungen erfüllen, entsprechend ANSI S1.11.1996 (R1976). A, B, C- Filter sollen „Type 1“- Anforderungen der ANSI S1.4-1983 entsprechen.
- Bandwidth (Bandbreite)
die minimale Bandbreite soll sich von der niedrigsten betrachteten Frequenz zur höchsten betrachteten Frequenz erstrecken.

2.3.3 Festlegung der Messsystem- Eigenschaften

Um zeitbedingte Größen wie Spitzenschalldruckpegel festzulegen sind drei Tests erforderlich:

- System Rise Time Capability (Anstiegszeit-Kapazität)
Messung des Schalldrucks von Stoßwellen
- Droop (Regeldifferenz)
Diese wird mit niedrigfrequentem Rechtecksignal bestimmt. Das Mikrofon wird hierbei in einem kleinen abgedichteten Hohlraum angebracht, in welchem ein schneller Druckwechsel produziert wird.
- Amplitude Frequency Response (Amplituden- Frequenz- Antwort)
Für Amplituden Frequenz Antwort-Messungen ist ein „Sine-wave-oscillator and loudspeaker“ empfohlen, außer für sehr niedrige Frequenzen.

Um zeitintegrierte Größen festzulegen sind zwei Test erforderlich:

- Amplitude Frequency Response (Amplituden- Frequenz- Antwort)
- Squaring and Integration Functions (quadrierende und integrierende Funktionen)
Diese sollen mit bekannten elektrischen transienten Funktionen $S(t)$, für welche der Wert des Zeitintegrals von $S^2(t)$ berechnet werden kann, bestimmt werden. Diese Funktionen sollen mit Signalen getestet werden, deren Spitzenpegel nicht mehr als 1 dB unter der oberen Grenze des Dynamikbereichs des Systems liegen.

2.3.4 Allgemeines zu den Messungen

Die Anforderungen an das Messsystem sind durch die gemessene Signalgröße definiert und sind stark von den Signaleigenschaften abhängig.

a) Kalibrierung

Es soll sämtliches Zubehör, wie Kabel, Verstärker ect, das für aktuelle Messungen benutzt wird, kalibriert werden. Die Kalibrierung sollte zu geeigneten Zeiten abgeschlossen sein, um zu gewährleisten, dass der zeitliche Mittelwert des Schalldruckpegels über den gesamten Dynamikbereich innerhalb von 0,5 dB gemessen werden kann. Normalerweise wird vor und nach jeder Testsequenz kalibriert. Um eine erfolgreiche akustische Kalibrierung durchzuführen, sollten akustische Kalibratoren, Pistaphone, akustische Stoßquellen oder statische Druck- Geräte benutzt werden.

b) das Mikrofon: Größe und Ausrichtung (siehe 4.3)

c) Integrationszeit

Die Integrationsperiode sollte lang genug sein, um den maßgeblichen Schall des Knallerignisses zu umfassen. Jedoch sollte die Periode nicht so lang sein, dass Schall, welcher nicht zum Schallereignis gehört, mit aufgenommen wird.

d) Hintergrundgeräusche

Das niedrigste Level der wichtigen Anteile der Wellenform sollte mindestens 5 dB über dem Hintergrundgeräusch-Pegel sein.

3 Material und Methode

Die Knallmessungen wurden in einem reflektionsarmen Raum mit schallabsorbierenden Wänden durchgeführt.



Abb. 6: Messraum

4.1 Das Messsystem

Beim Messsystem handelt es sich um ein Gerät der Firma National Instruments PXI mit der Messkarte NIPXI4461.



Abb. 7: Messsystem National Instruments

4.2 Das Programm LabVIEW und Set Up

Die Messungen für diese Arbeit wurden mit dem von der Firma National Instruments entwickelten Softwaresystems LabVIEW durchgeführt. Dieses ist ein Programm für messtechnische Anwendungen.

Um die Messdaten genau erfassen zu können und die wichtigsten Messgrößen zu bestimmen wurde ein individuelles Programm erstellt.

Abbildung 6 zeigt den programmierten Ablauf von Erfassung des Schalldrucks bis hin zum gefilterten und getriggerten Signal.

Abbildung 7 zeigt diesen Ablauf nochmals in vereinfachter Darstellung.

Das analoge Signal wird vom Mikrophon erfasst. Das Signal wird digitalisiert. Mit Hilfe des Triggers kann der Zeitpunkt, an dem die Daten einzulesen sind, exakt bestimmt werden. Dieser sichert somit, dass die Daten im richtigen Format und zur richtigen Zeit erhalten werden (siehe 4.2.2). Das getriggerte Signal wird gefiltert mit Hilfe eines Besselfilters (siehe 4.2.3).

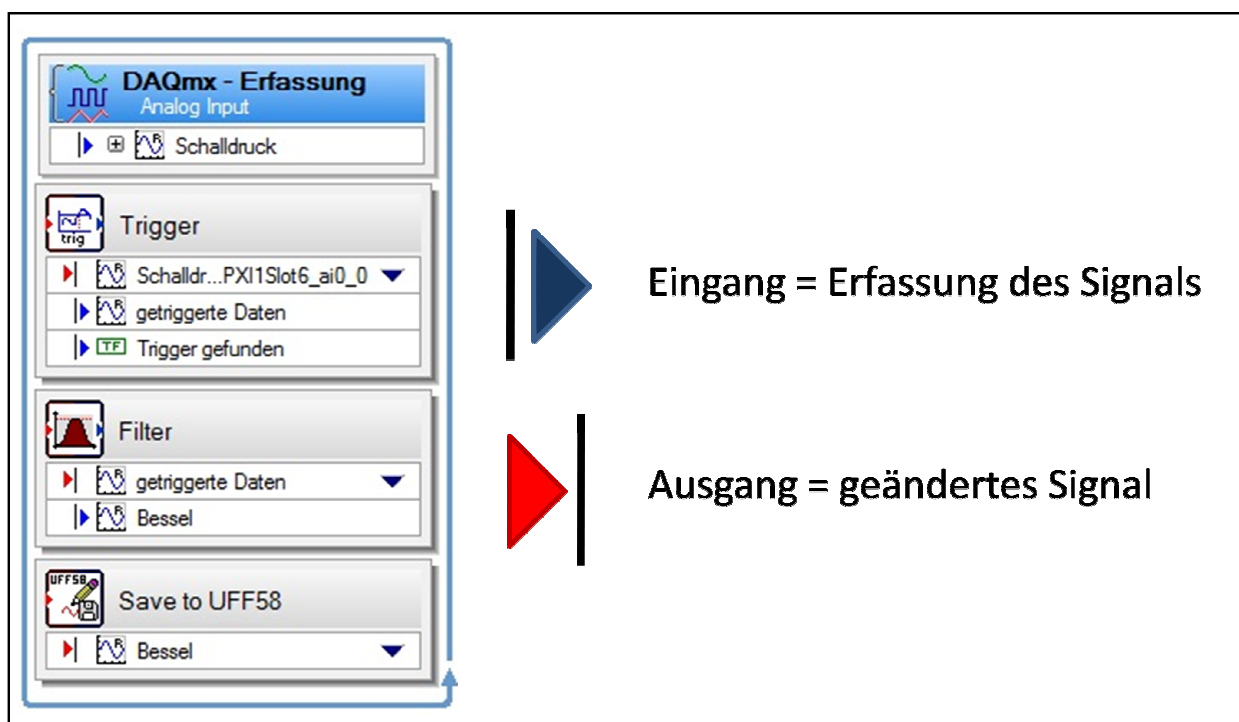


Abb. 8: Programmablauf

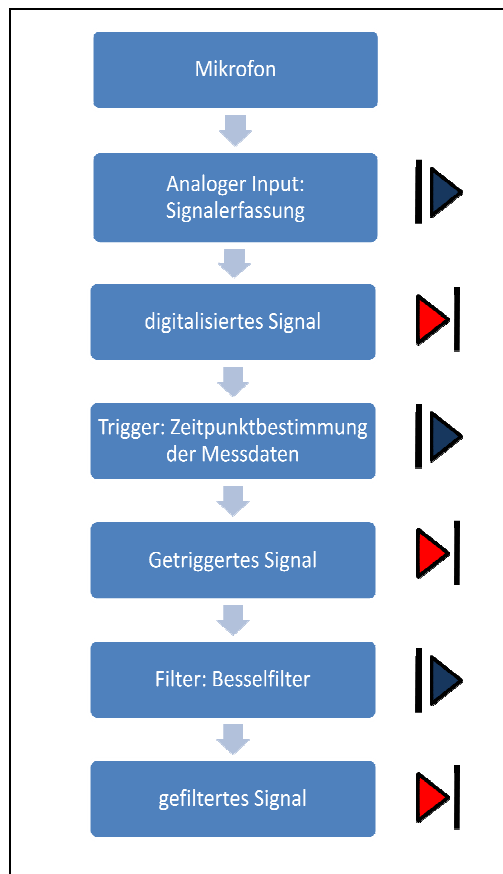


Abb. 9: Vereinfachte Darstellung Programmablauf

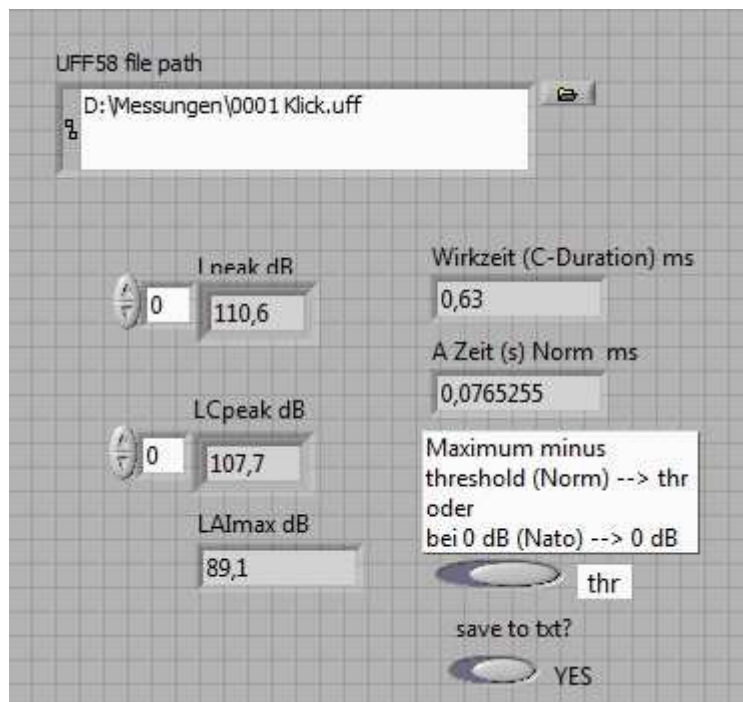


Abb. 10: LabVIEW Messergebnisse

Um den Schall zeitlich und spektral darstellen zu können, führt Labview eine Terzanalyse durch (Abbildung 11). Die Schallleistung wird als Schalleistungsspektrum dargestellt, hier als Terzspektrum. Bei der Darstellung wird nun anstelle des Gesamtschalldrucks das Schalldruckspektrum in Oktav-, Terz- oder Schmalbändern dargestellt. Das Eingangssignal wird durch die entsprechenden Bandpässe gefiltert. Von den gefilterten Zeitsignalen an den Ausgängen der Bandpassfilter wird ein äquivalenter Dauerschallpegel gerechnet. Die Mittenfrequenzen für Terzfilter sind:

20, 25, 31,5, 40, 50, 63, 80, 100, 125, 160, 200, 250, 315, 400, 500, 630, 800, 1000, 1250, 1600, 2000, 2500, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 12500, 16000, 20000 Hertz (Henn et al., 2008)

In Abbildung 11 sind der gemessene Zeitverlauf und die zugehörige Terzanalyse des akustischen Knalls dargestellt.

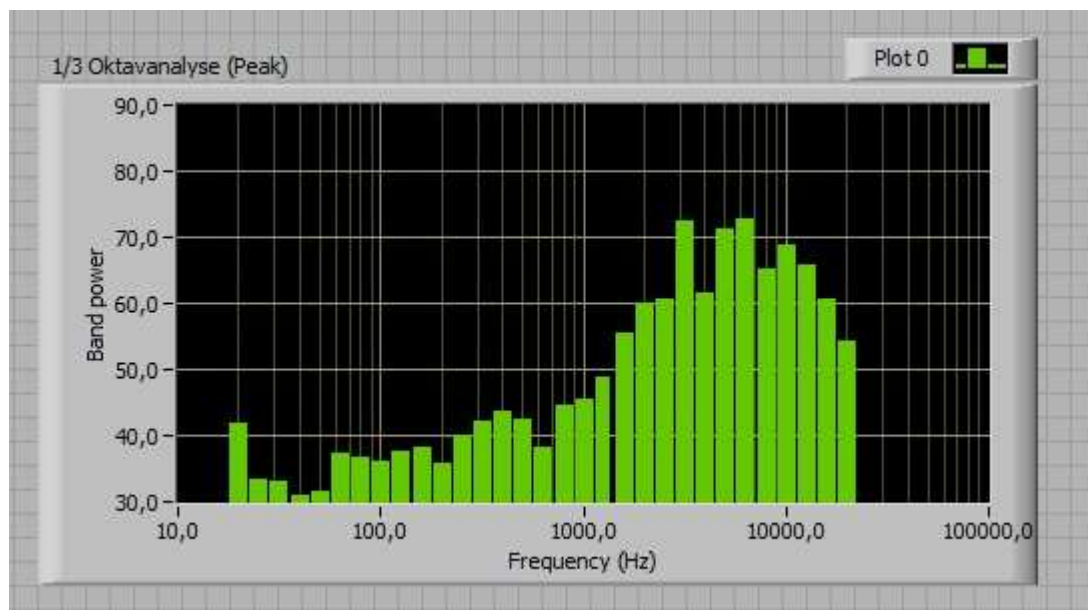


Abb. 11: Terzanalyse

Folgende von dem Programm LabView vorhandene Parametern wurden gewählt, um die Knalle messtechnisch korrekt aufzunehmen:

4.2.1 Schalldruckmessung

„Unter dem Schalldruck versteht man den das Schallfeld in Gasen und Flüssigkeiten bestimmenden, sich örtlich ändernden Wechseldruck, der dem sog. Ruhedruck (atmosphärischer

oder hydrostatischer Druck) überlagert ist“ (Rielländer 1982, S. 305). Er wird mit Hilfe eines Mikrofons gemessen. Das Mikrofon (siehe 4.3) agiert als Messaufnehmer, welcher eine proportionale Spannung zum Schalldruck aufzeigt.

4.2.2 Trigger

Triggern bedeutet Auslösen und beschreibt jede Möglichkeit ein DAQ- Ereignis einzuleiten, abzuschließen oder zu synchronisieren. Ein DAQ Ereignis ist die Sammlung von Daten. Um den Zeitpunkt, an dem die Daten einzulesen sind, exakt bestimmen zu können und somit die Messdaten erfasst werden können, ist ein Trigger notwendig. Dieser wirkt als analoges oder digitales Signal, welches analysiert wird, um den Prozess zu steuern (Wells, 1997). Dieser sichert somit, dass die Daten im richtigen Format und zur richtigen Zeit erhalten werden. Er „entnimmt nach Eintreten des angegebenen Triggers einen Abschnitt aus einem fortlaufenden Signal. Der Schritt wartet, bis ein Signal eine Trigger-Bedingung erfüllt und gibt einen Abschnitt des Signals aus, der vor oder nach dem Trigger-Punkt beginnt“ (Labview).

Bei der Konfiguration des Triggers wurden folgende Parameter eingestellt:

Tabelle 2: Trigger Parameter

Trigger Parameter	Wert
Trigger Modus	Positive Steigung
Pegel	1,0
Hysterese	0,0
Samples vor dem Trigger	2000
Timeout (s)	10

1. Trigger- Modus: positive Steigung, diese „gibt an, dass der Trigger ausgelöst werden soll, wenn ein Signal den angegebenen Pegel mit einer positiven Steigung überschreitet“ (Labview).
2. Pegel: 1,0, dieser „gibt den Pegel an, den das Signal erreichen muss, damit das Eingangssignal getriggert wird“ (Labview)

3. Hysteresis: 0,0 = Voreinstellung, diese „gibt den Bereich über und unter dem Trigger-Pegel an, den das angegebene Signal passieren muss, damit das Durchschreiten des Trigger-Pegels zuverlässig erkannt wird“ (Labview).
4. Samples vor dem Trigger: 2000, „gibt an wie viele Samples vor dem Erkennen des Triggers erfasst werden sollen“ (Labview).
5. Timeout (s): 10= Voreinstellung, „gibt den Hardware- Timeout in Sekunden an“ (Labview).

4.2.3 Filter

Dieser filtert ein Zeitsignal und kann unerwünschte Frequenzen dämpfen oder entfernen und gibt nur die entscheidenden Informationen weiter. Es gibt eine Reihe verschiedener Filtertypen und Filterfunktion. In der folgenden Tabelle ist die Einstellung des verwendeten Filters dargestellt. Alle nicht aufgeführten Parameter wurden in der Voreinstellung übernommen.

Tabelle 3: Filter Parameter

Filter Parameter	Wert
Filtermodus	IIR
Typ	Tiefpass
Typologie	Bessel
Ordnung	8
Grenzfrequenz	4 kHz

Der Filtermodus IIR ist ein Digitalfilter mit unendlichem Impulsansprechverhalten. Die Filtereigenschaften digitaler Filter sind variabel und „die mögliche Komplexität des Filters nur durch die Rechengeschwindigkeit begrenzt ist“ (Görne, 2006, S. 146) sind IIR- Filter arbeiten schnell und sind weniger rechenintensiv. Knalle sind kurzzeitige und schnelle Schallereignisse, deshalb sind bei deren Messung IIR-Filter die richtige Wahl. Die Typologie und somit das Filterdesign ist Bessel, ein Frequenzfilter. Der Amplituden- und Phasengang ist maximal flach

und die nicht lineare Phasenverzerrung kann reduziert werden (Georgi 2009). Der Vorteil dieses Filters ist, dass dieser das Signal weniger als andere Filter durch Überschwingungen beeinflusst. Abbildung 12 und 13 zeigen die Datenansicht eines Signals im Zeitgraphen mit Besselfilterung (blauer Graph) und den getriggerten Daten (grüner Graph). Knallquelle ist in Abbildung 12 die Spielzeugpistole R8 (kurzer Schall) und in Abbildung die helle Klappe (längerer Schall). Es ist zu erkennen dass der Besselfilter bei sehr kurzen Knallen die eigentliche Pegelspitze nicht erreicht und somit das Signal verfälscht und dämpft. Die Verwendung des Besselfilter ist somit abhängig von der Zeitstruktur des Signals. In dieser Arbeit stellte sich bei den Messungen nur die Signale der Spielzeugpistolen als „kurze Signale“ heraus. Bei der Erfassung dieser Signale wurde in der Programmierung der Besselfilter entfernt. Bei den Signalen aller anderen Knallquellen zeigt der Besselfilter wenig Unterschied zu den getriggerten Daten auf (siehe Abbildung 13) .

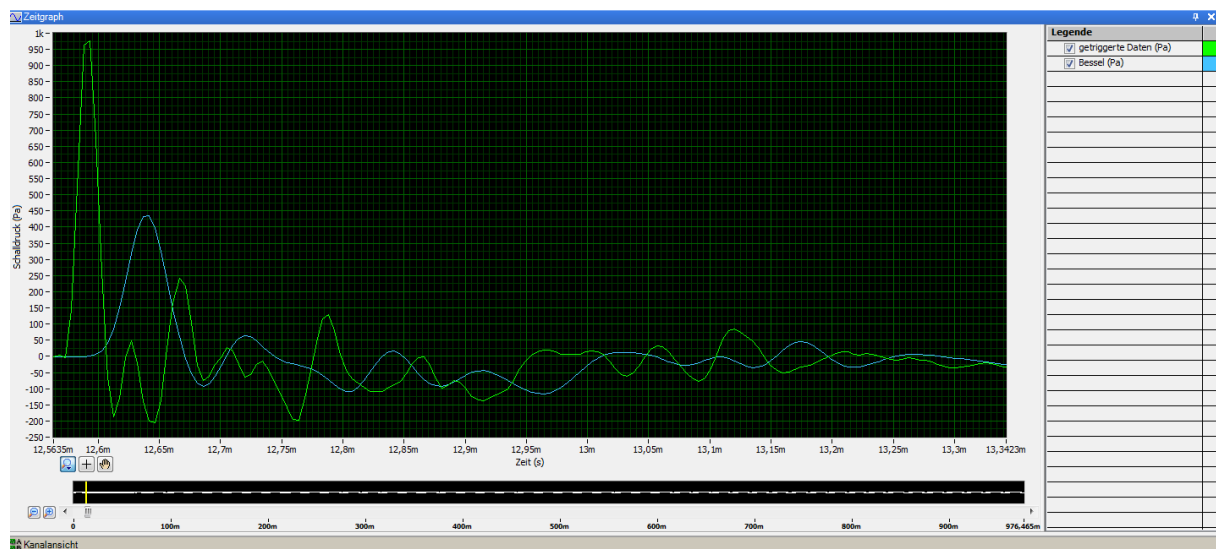


Abb. 12: Datenansicht des Signals , Spielzeugpistole (getriggerte Daten vs. Bessel)

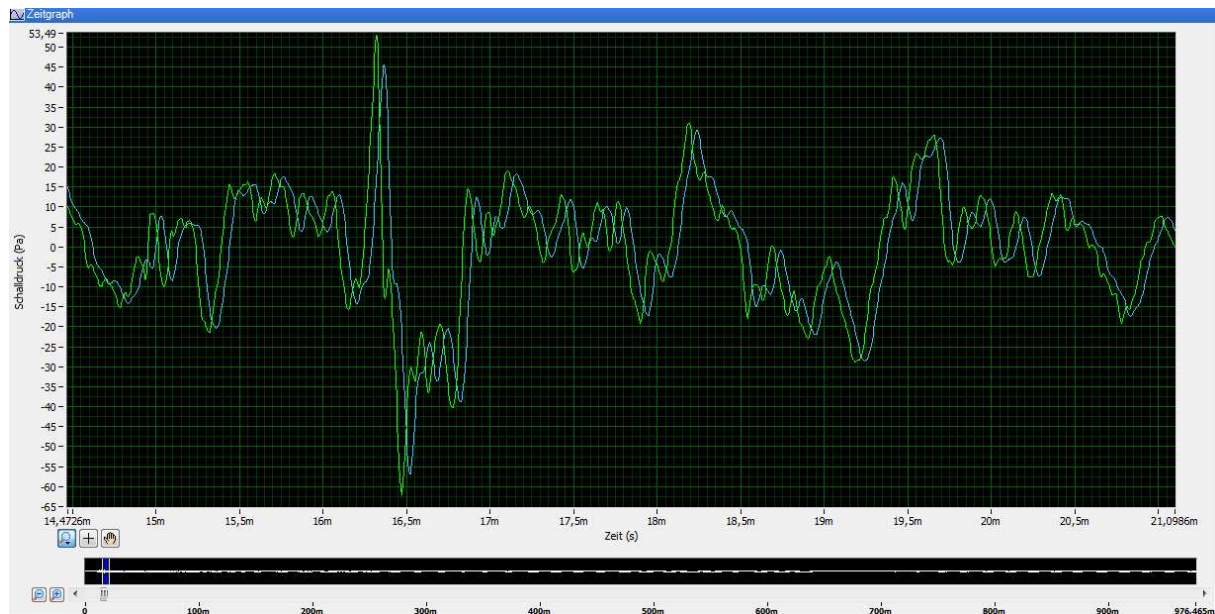


Abb. 13: Datenansicht eines Signals, Klappe hell (getriggerte Daten vs. Bessel)

Die Ordnung gibt Aussage über den Übergang zwischen Durchlass- und Sperrbereich. Je höher die Ordnung, desto steiler wird dieser. Dennoch sinkt mit steigender Ordnung die Verarbeitungsgeschwindigkeit und Verzerrungen können anfangs auftreten. Die Voreinstellung lautet 2.

Die Grenzfrequenz ist mit 4 kHz eingestellt, die Voreinstellung lautet 100 Hz. Der übliche und hier gewählte Filtertyp ist der Tiefpass, welcher nur tiefe Frequenzen passieren lässt. Charakteristisch für den Tiefpassfilter sind seine Grenzfrequenz und seine Flankensteilheit. Als Durchlassbereich des Filters wird der Frequenzbereich unterhalb der Grenzfrequenz bezeichnet und der Sperrbereich ist der Frequenzbereich oberhalb der Grenzfrequenz (Görne, 2006).

4.2.4 UFF58 Datei

Jede Messung wird als „uff-Datei“ gespeichert. Diese führt alle Daten und Dateioperationen durch, die notwendig sind, um Zeitsignale oder reellwertige Spektren als Datei zu schreiben, die gemäß dem UFF58-Format formatiert ist. Die Datei kann dann in verschiedene Ton- und Vibrationsanwendungen importieren werden, um zusätzliche Analysen durchzuführen.

4.2.5 Sampling Rate

„Durch die Abtastung (engl. sampling) wird das zeitkontinuierliche Signal ohne Informationsverlust in ein zeitdiskretes Signal aus endlich vielen Stichproben umgewandelt“ (Görne, 2006, Seite 150).

Die Abtastrate ist mit 240 Hertz eingestellt.

4.3 Das Mikrofon



Abb. 14: Das Messmikrofon

Für die Signalaufnahme wurde folgendes Mikrofon verwendet:

Tabelle 4: Mikrofoneigenschaften

Hersteller	iSEMcon
Typ	EMM-13D082/H-CCP/B-T
Empfindlichkeit	6mV/Pa
Größe (3 dB distortion limit)	>140 dB SPL
Durchmesser	7mm (1/4")
Typ Linearity, IEC (20Hz – 20 kHz) 60541	1

Die Spezifikationen des Mikrofons entsprechen den Anforderungen für Klasse 1 Geräte nach IEC (20Hz - 20kHz) 60541.

„Die Standard- Messbedingungen für Mikrofone sind 1 m Abstand zum Messlautsprecher und 1 Pa Schalldruck (94 dB)“ (Görne, 2006, Seite 271). Die Messungen dieser Arbeit entsprechen diesen Bedingungen nur teilweise, weil es primär um die Reproduzierbarkeit der Referenzquellen geht als um das Einhalten des Standards. Deswegen wurde bei den Messungen der Abstand zur Schallquelle variiert.

Das American National Standard Institute formuliert in Methods for Measurement of Impulse Noise (Acoustical Society of America, 2006) die Eigenschaften und die Ausrichtung des Mikrofons bei der Knallmessung:

Dieser Standard besagt, dass Größe und Durchmesser entscheidend für die Messung sind. Es sollen kleine Durchmesser benutzt werden, passend zum räumlichen Ausmaß des Schallimpulses. Der Reflexionsdruck wirkt sich, je kleiner der Durchmesser, erst ab sehr hohen Frequenzen aus (Pfander 1994). Bei Falsch Ausrichtung des Mikrofons können Fehler von +/- 9dB in den gemessenen Spitzenschalldruckpegeln entstehen. Der Druckaufnehmer sollte so aufgestellt und montiert werden, dass seine Membran parallel (streifender Einfall) zu den Schallwellen angeordnet ist (Acoustical Society of America, 2006). In reflektierender Umwelt, wie in einem geschlossenen Raum sollen omnidirektionale Mikrofone benutzt werden. Diese ANSI- Norm ist primär für hochexplosive Knallmessungen ausgerichtet, die gegebenenfalls eine Druckwelle auslösen. Bei den Messungen dieser Arbeit handelt es sich nicht um Knalle dieser Art, es wird bei keinem Knall eine Druckwelle ausgelöst. Deswegen konnte in der Ausrichtung des Mikrofons variiert werden, um die verschiedenen Einfallswinkel miteinander zu vergleichen und die reproduzierbarste Variante festzustellen.

4.4 Referenzquellen

Ziel dieser Arbeit ist es, reproduzierbare Referenzquellen zu definieren. Mit Hilfe des Labview- Programm wurden verschiedene Knallquellen gemessen und auf ihre Reproduzierbarkeit überprüft. Hierbei stellt sich die Frage, ab wann gilt ein Knall als reproduzierbar bzw. wie lässt sich die Reproduzierbarkeit einer Knallquelle definieren? Im Vorfeld dieser Arbeit wurde nach geeigneten Knallquellen gesucht und sämtliche Überlegungen und Einfälle wurden gemessen und getestet. Es stellte sich schnell heraus, dass Knalle, wie sie uns im Alltag begegnen, wie Klatschen, Schnipsen, zerplatzende Luftballons, fallende Schlüssel oder ähnli-

ches wenig reproduzierbar sind, weil sie von mehreren Parametern abhängig sind und keinen Automatismus aufweisen. Interessanter sind Impulse, die aufgrund ihrer vorgegebenen, nicht-veränderbaren Konstruktion/Vorrichtung bei Betätigung knallen und dabei ein konstantes Ergebnis der entscheidenden Parameter liefern. Hierbei ist es außerdem entscheidend, dass diese Impulsquellen auch in anderer Messumgebung konstante Ergebnisse liefern. Dies wurde bei den einzelnen Referenzquellen zudem gemessen.

Im Vorfeld wurde ein Knall im Idealfall als reproduzierbar definiert mit einer Abweichung von $\pm 1\text{dB}$ in Bezug auf den Spitzenschalldruckpegel. Außerdem soll er bei unterschiedlichen Einfallswinkeln und Abständen zum Mikrofon ein konstantes Ergebnis liefern.

4.4.1 Vorstellung der einzelnen Knallquellen

4.4.1.1 Klappe Schwarz



Abb. 15: Klappe schwarz

4.4.1.2 Klappe hell



Abb. 16: Klappe hell

4.4.1.3 Klicker

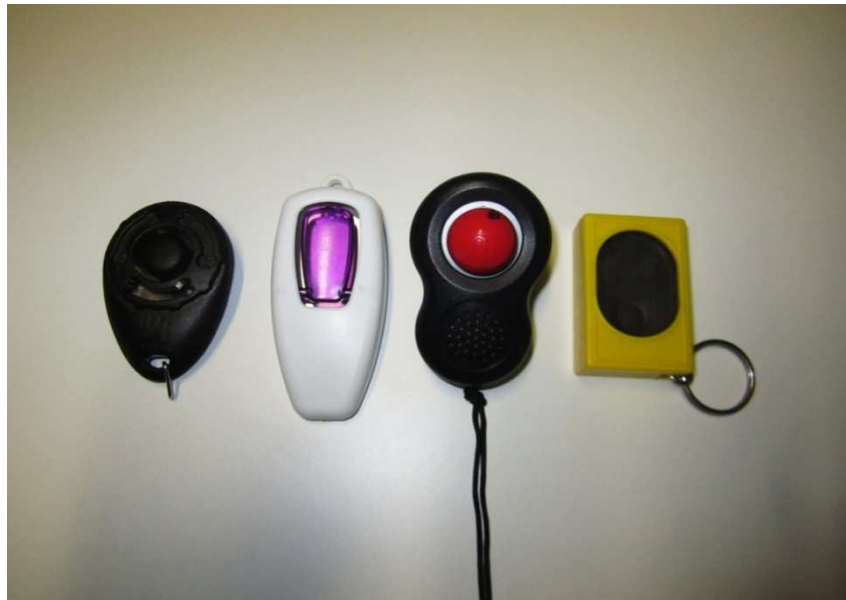


Abb. 17: Klicker

4.4.1.4 Spielzeugpistolen



Abb. 20: Spielzeugpistole R8, Munition USA



Abb. 19: Spielzeugpistole R8, Munition Deutschland



Abb. 18: Spielzeugpistole, Munition USA

4.4.1.5 Schreckschusspistole



Abb. 21: Schreckschusspistole 9 mm

4 Ergebnisse

Die Referenzquellen wurden in verschiedenen Einfallswinkeln zum Mikrofon gemessen, um die Reproduzierbarkeit der Referenzquellen in verschiedenen Messsituationen zu testen.



Die Schallquelle befindet sich 0 Grad zum Mikrofon. Dies wird frontaler Einfall genannt



Die Schallquelle befindet sich 90 Grad zum Mikrofon. Dies wird streifender Einfall genannt und ist laut ANSI die Standardbedingung bei Knallmessungen

Abb. 23: 90 Grad



Die Schallquelle befindet sich 180 Grad zum Mikrofon.

Abb. 24: 180 Grad

Die Referenzquellen wurden neben verschiedenen Einfallswinkeln außerdem in verschiedenen Abständen gemessen.

Bei der Ergebnisbetrachtung sind folgende Knallcharakteristika interessant:

- der Spitzenpegel
- Die Knallcharakteristika wie C- Duration
- Frequenzcharakteristik des Schalls

Der Spitzenpegel ist zunächst entscheidend für die Aussage der Reproduzierbarkeit einer Referenzquelle. Es wurden in verschiedenen Abständen und Einfallswinkeln jeweils vier bis fünf Mal eine Referenzquelle gemessen.

4.1 Der Spitzenpegel

5.1.1 Klappe schwarz

Hier interessiert bei unterschiedlichem Abstand und unterschiedlichem Einfallswinkeln die Standardabweichung der Spitzenpegel. Die Mikrofonhöhe beträgt bei allen Messungen 60 cm. Dies entspricht der Höhe der Klappenöffnung in der Konstruktion.

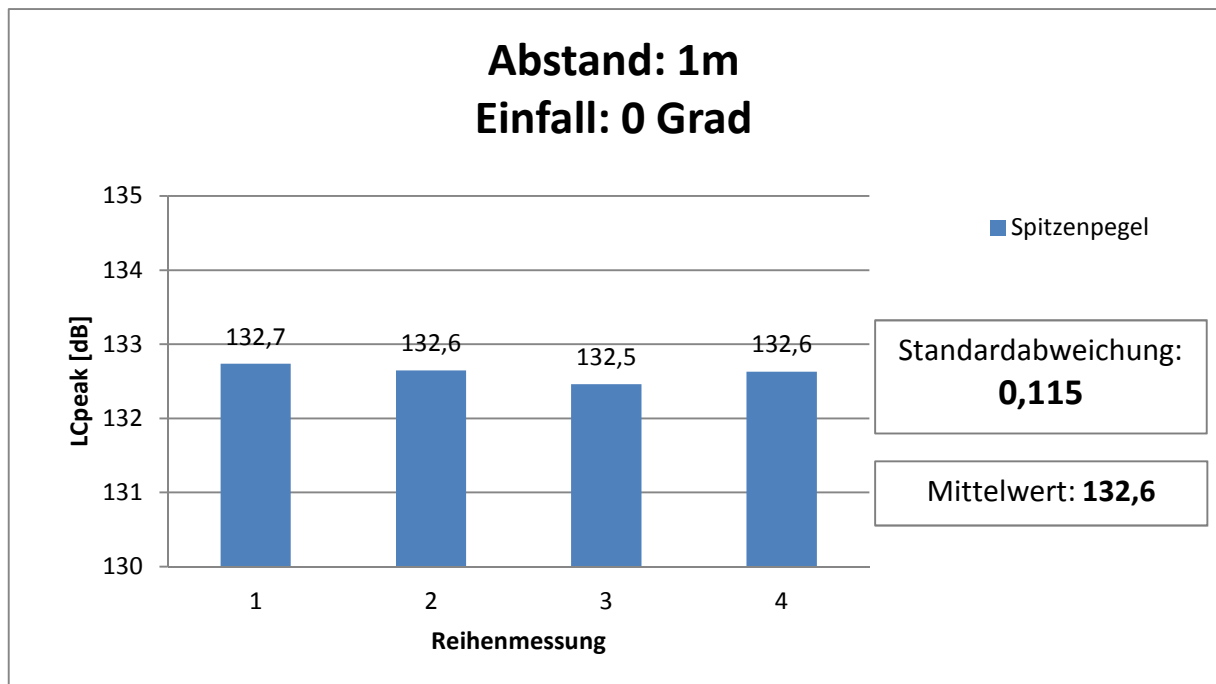


Abb. 25: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz, 1m 0 Grad

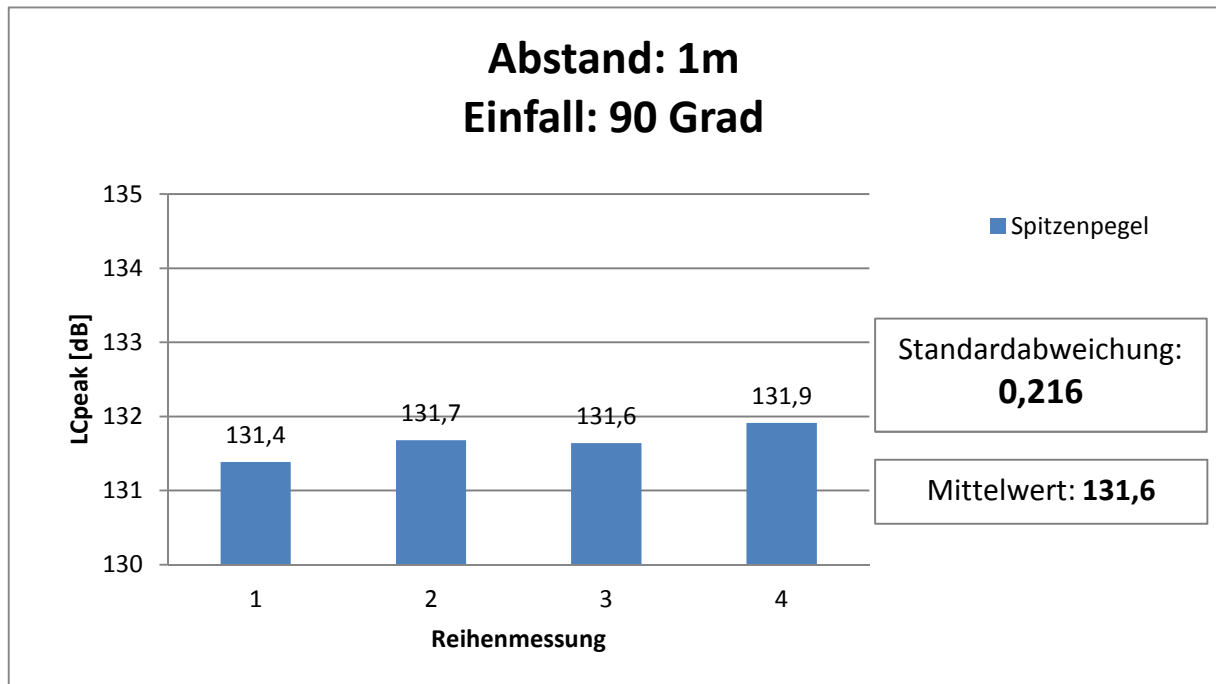


Abb. 26: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz, 1m 90 Grad

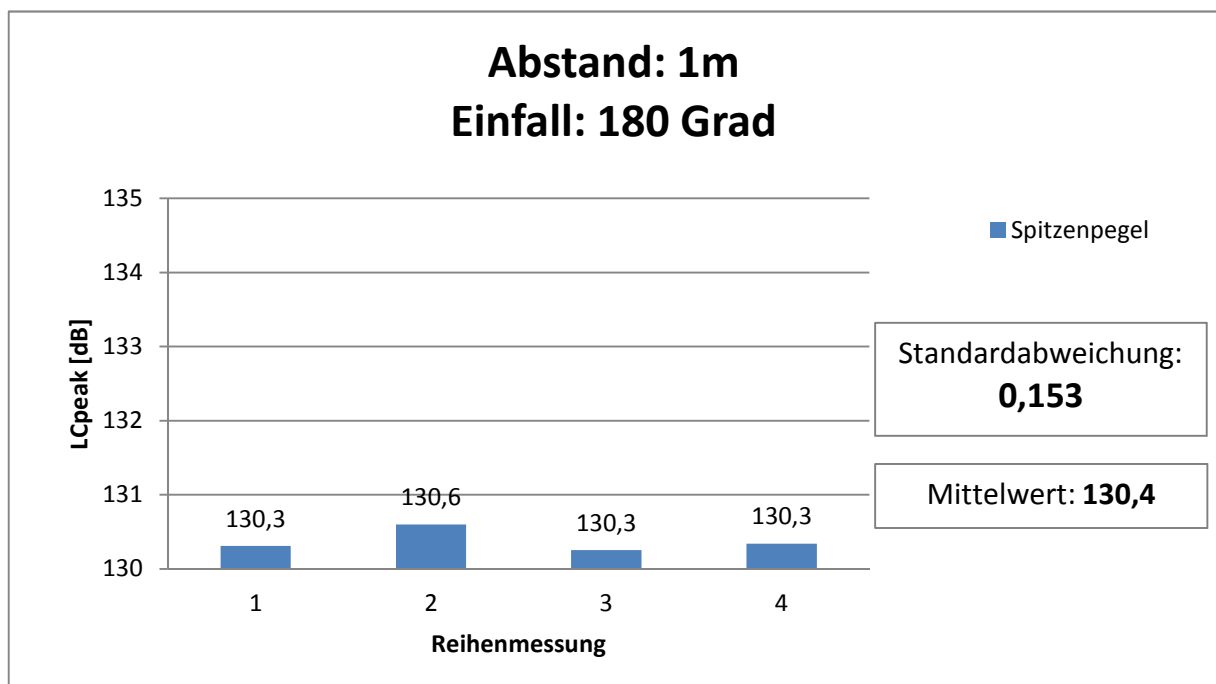


Abb. 27: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz, 1m 180 Grad

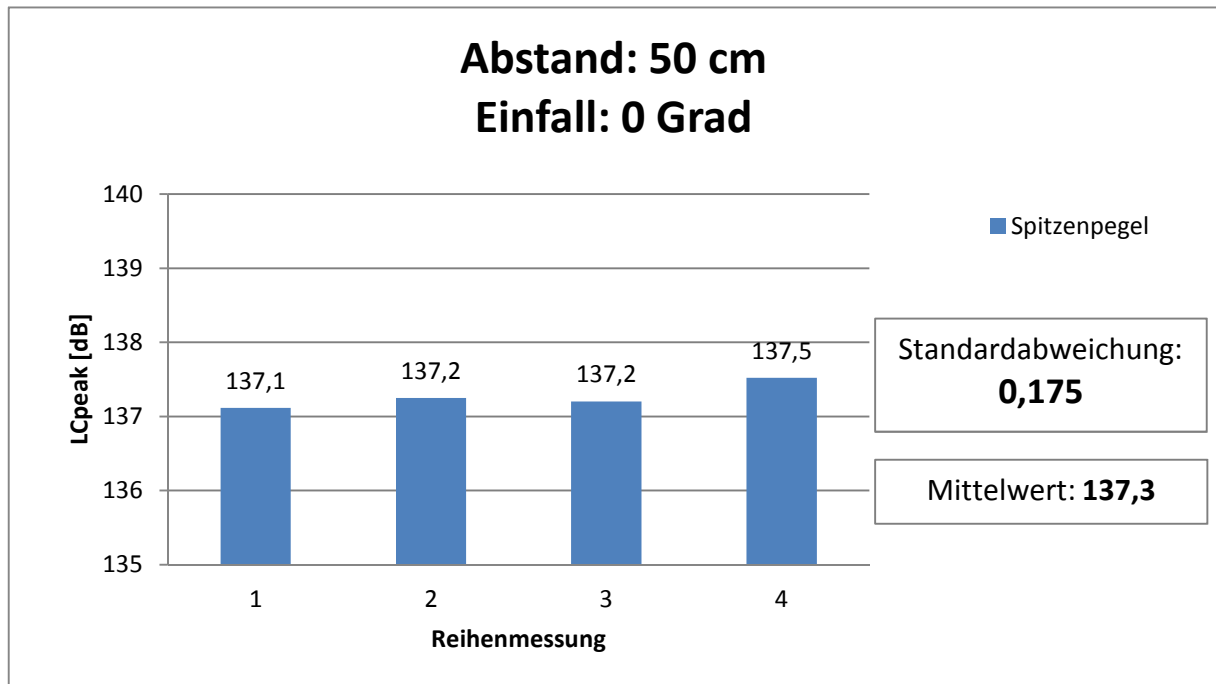


Abb. 28: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz, 50cm 0 Grad

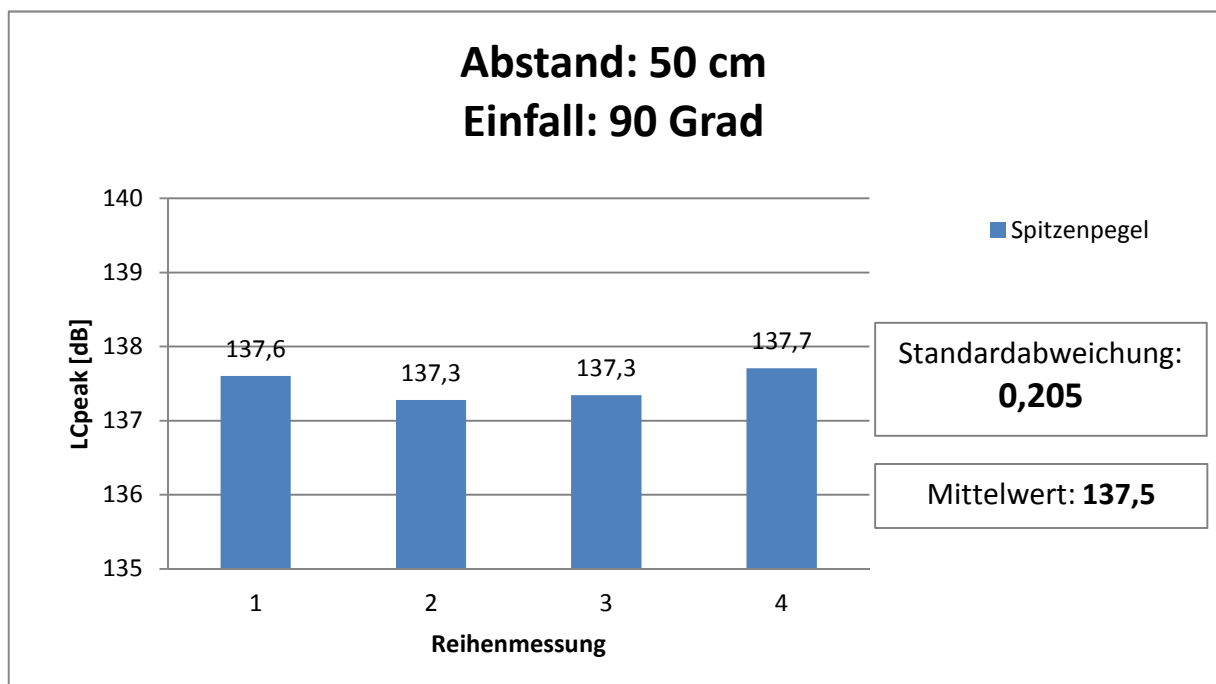


Abb. 29: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz, 50cm 90 Grad

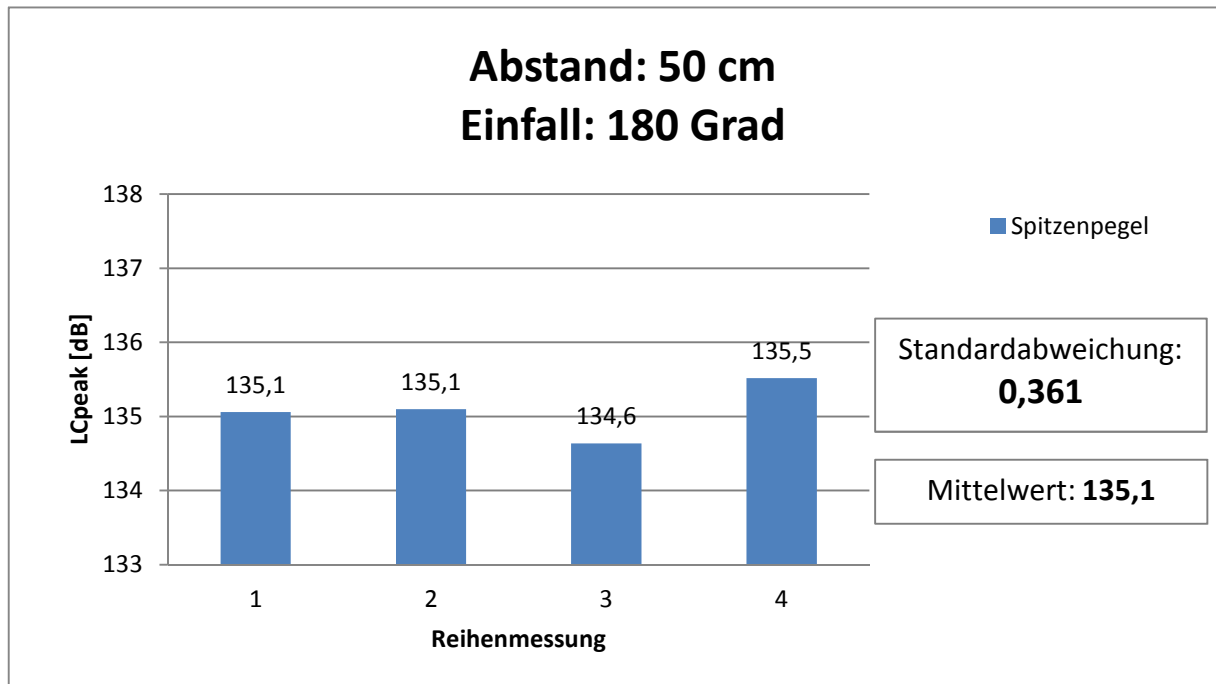


Abb. 30: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz, 50 cm 180 Grad

Die Ergebnisse sind in allen Abständen und allen Einfallswinkeln sehr reproduzierbar. Die Standardabweichung beträgt in allen Messeinheiten unter 0,5. Die schwarze Klappe ist in Bezug auf den Spitzenpegel reproduzierbar.

4.1.2 Klappe hell

Hier interessiert ebenfalls bei unterschiedlichem Abstand und unterschiedlichem Einfallswinkeln die Standardabweichung der Spitzenpegel. Die Mikrofonhöhe beträgt bei allen Messungen 110 cm. Dies entspricht der Höhe der Klappenöffnung in der Konstruktion.

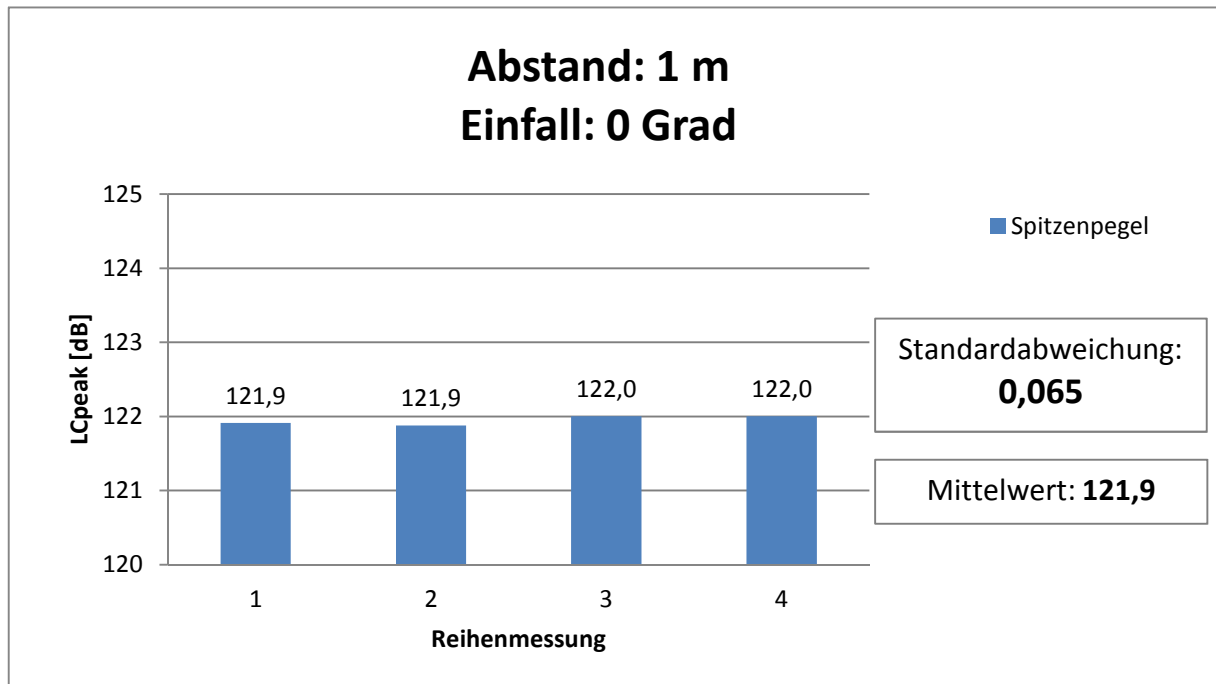


Abb. 31: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe hell, 1m 0 Grad

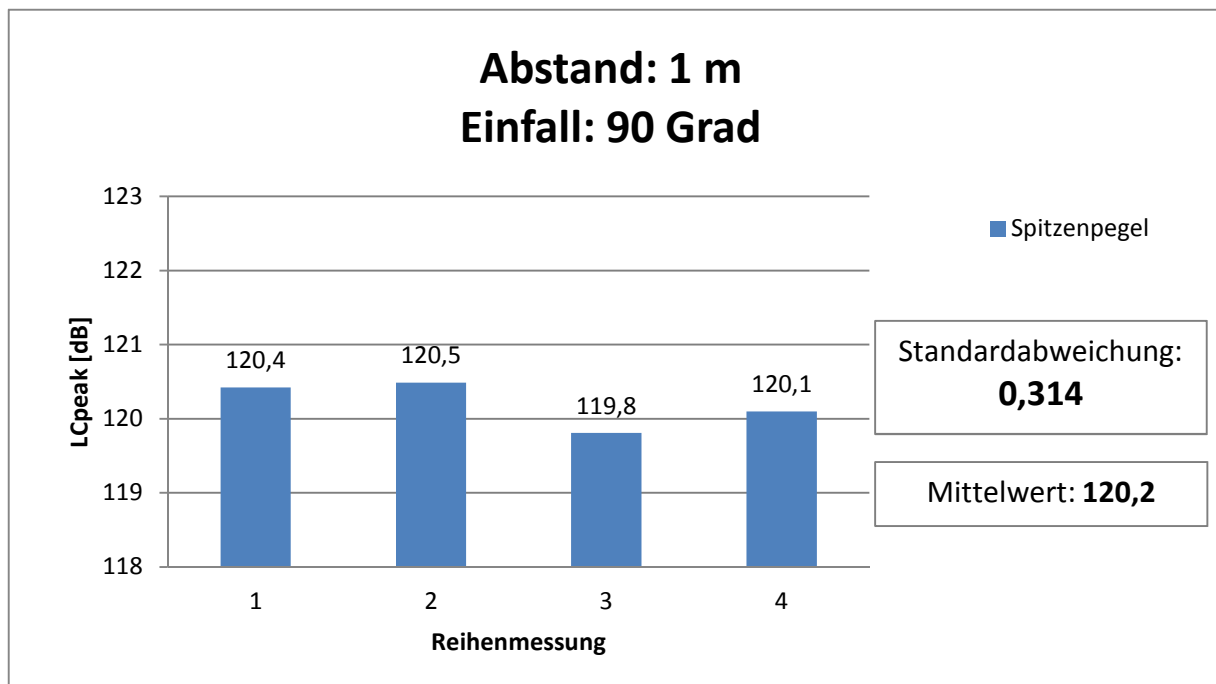


Abb. 32: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe hell, 1m 90 Grad

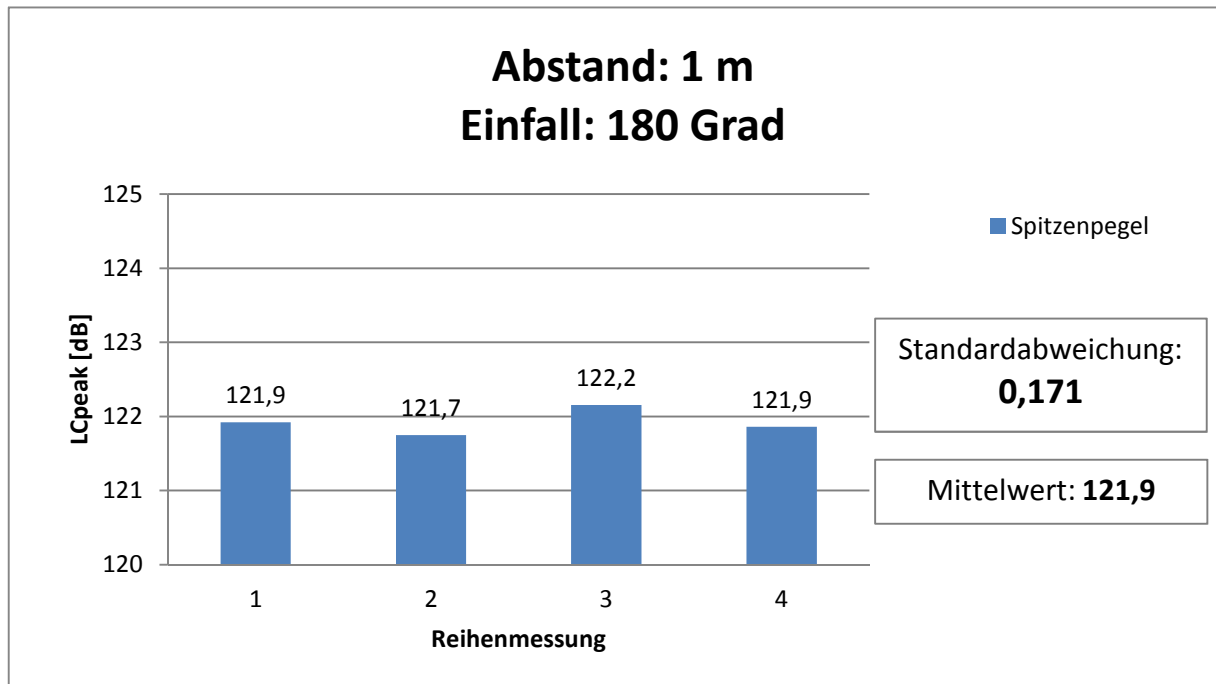


Abb. 33: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe hell, 1m 180 Grad

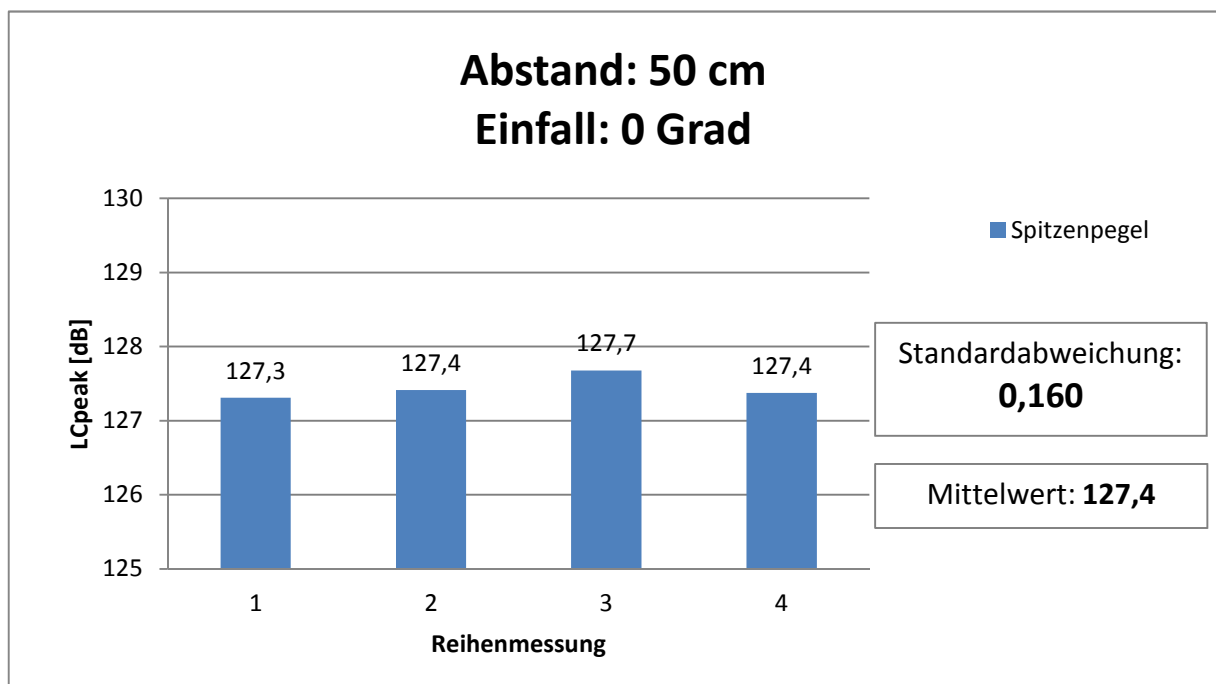


Abb. 34: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe hell, 50 cm 0 Grad

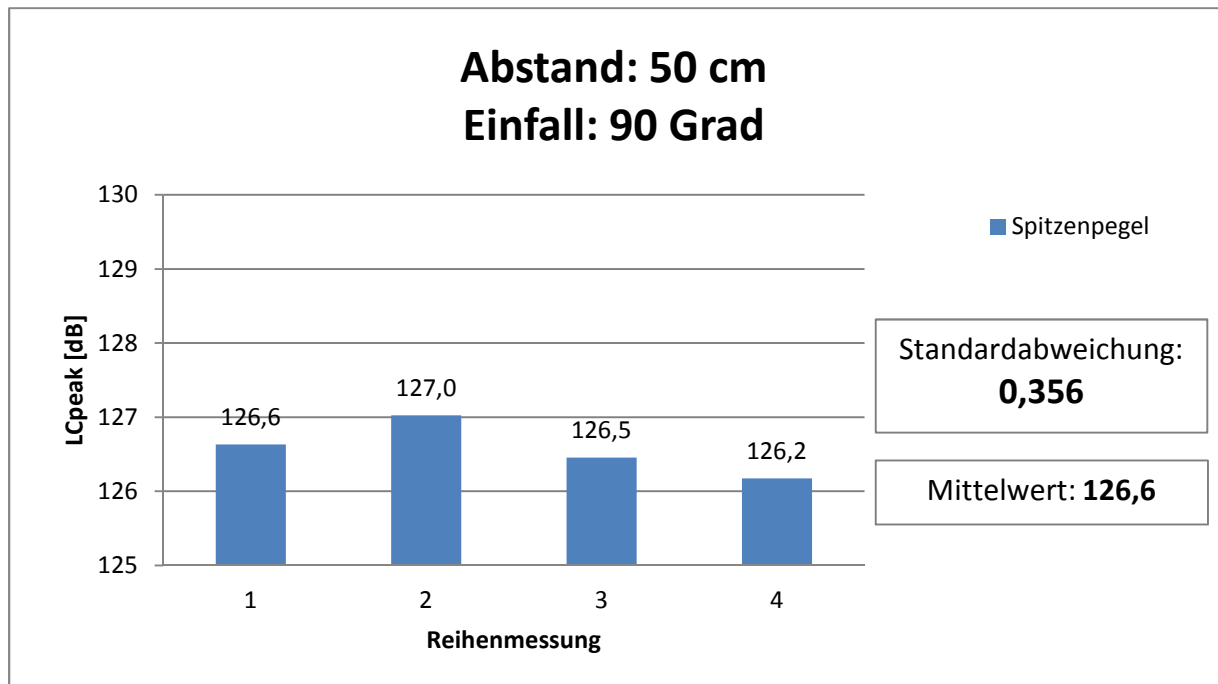


Abb. 35: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe hell 50 cm 90 Grad

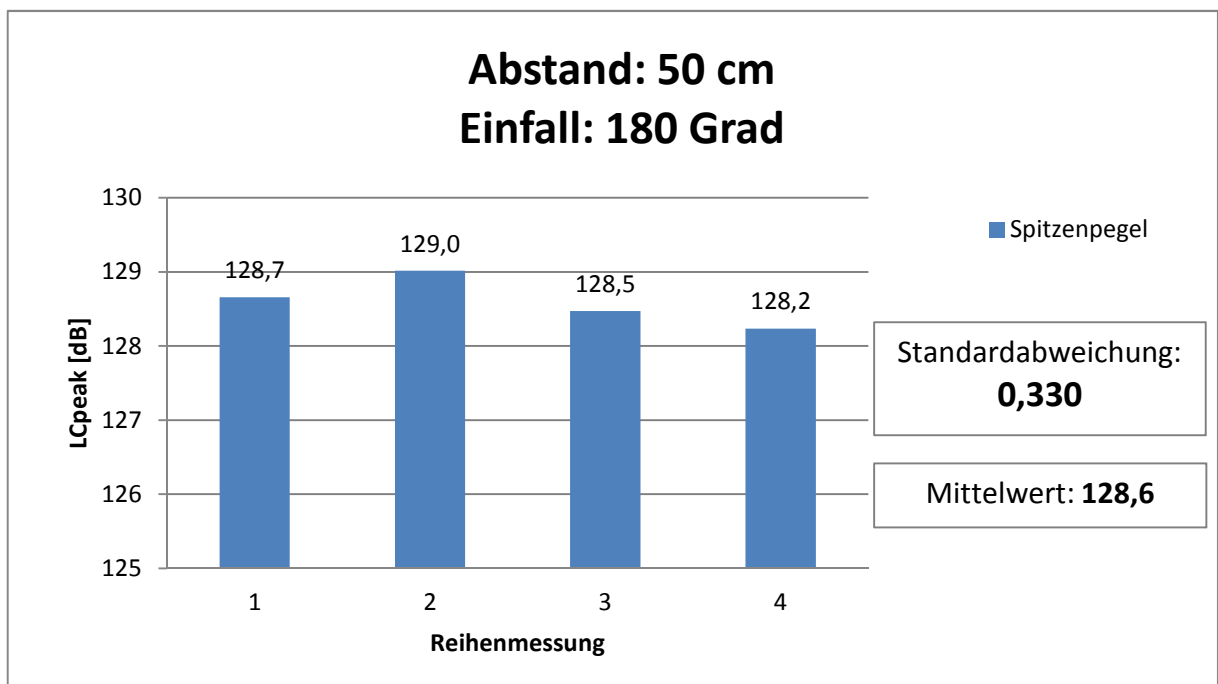


Abb. 36: Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe hell 50 cm 180 Grad

Auch die helle Klappe ist in Bezug auf den Spitzenpegel reproduzierbar. Die Standardabweichung beträgt in allen Messeinheiten unter 0,5.

4.1.3 Klicker

Jeder Klicker wurde ebenfalls vier Mal in den verschiedenen Abständen und Einfallswinkeln gemessen. Bei der Ergebnispräsentation der vier Klicker sind die Messungen zusammengefasst und es ist nur die Standardabweichung der Spitzenpegel in den entsprechenden Abständen und Einfallswinkeln dargestellt.

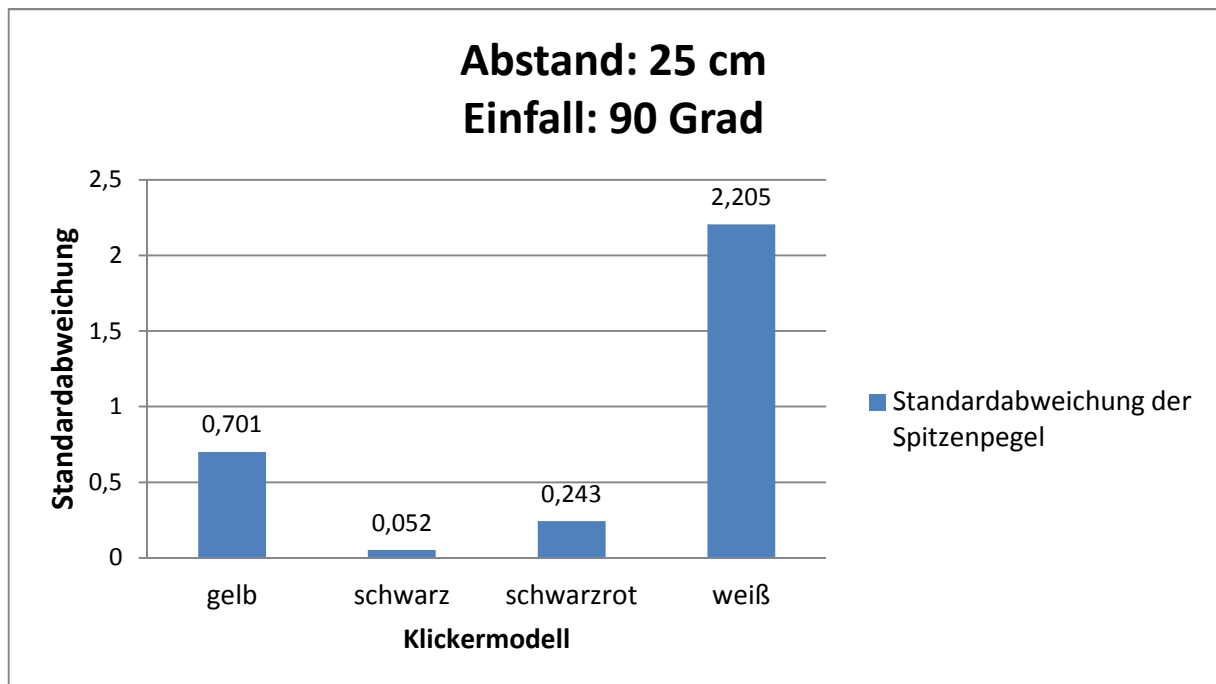


Abb. 37: Klicker, Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, 25 cm 90 Grad

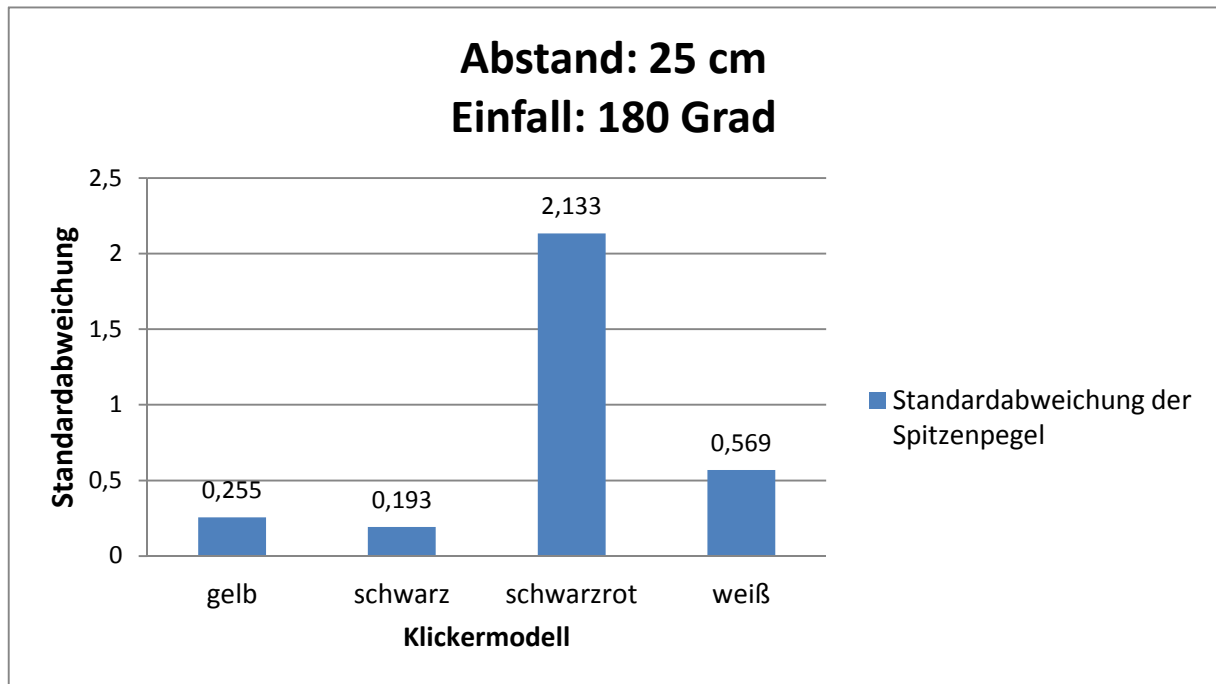


Abb. 38: Klicker, Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, 25 cm 180 Grad

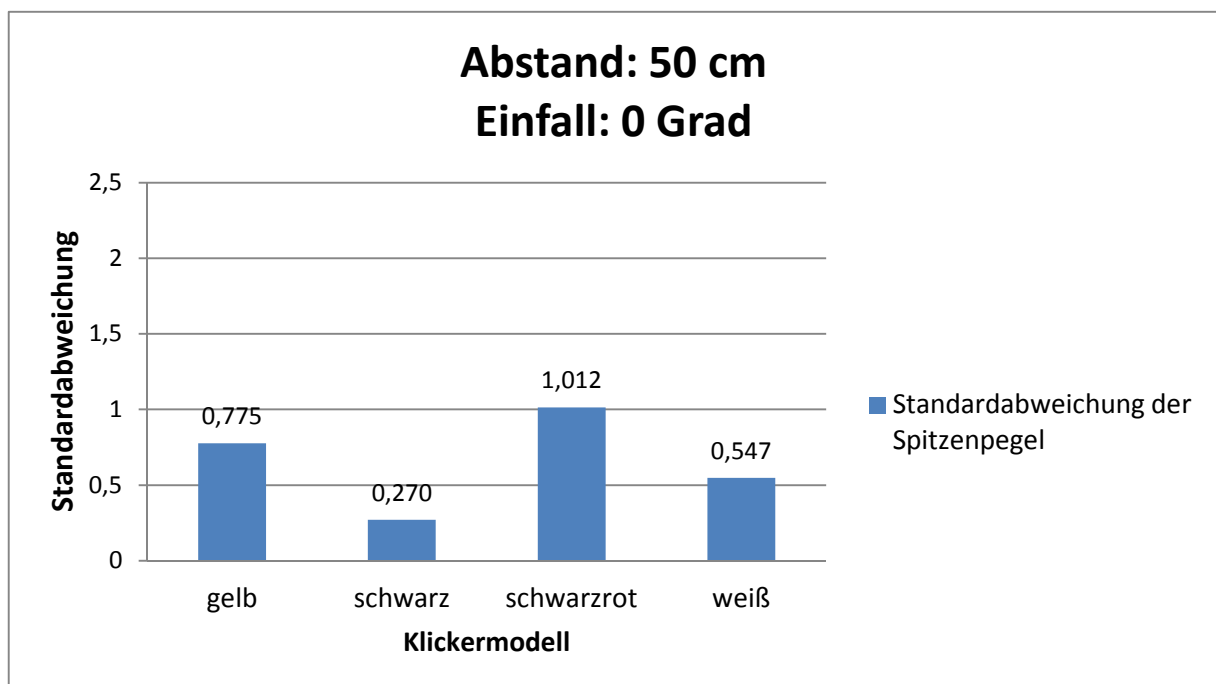


Abb. 39: Klicker, Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, 50 cm 0 Grad

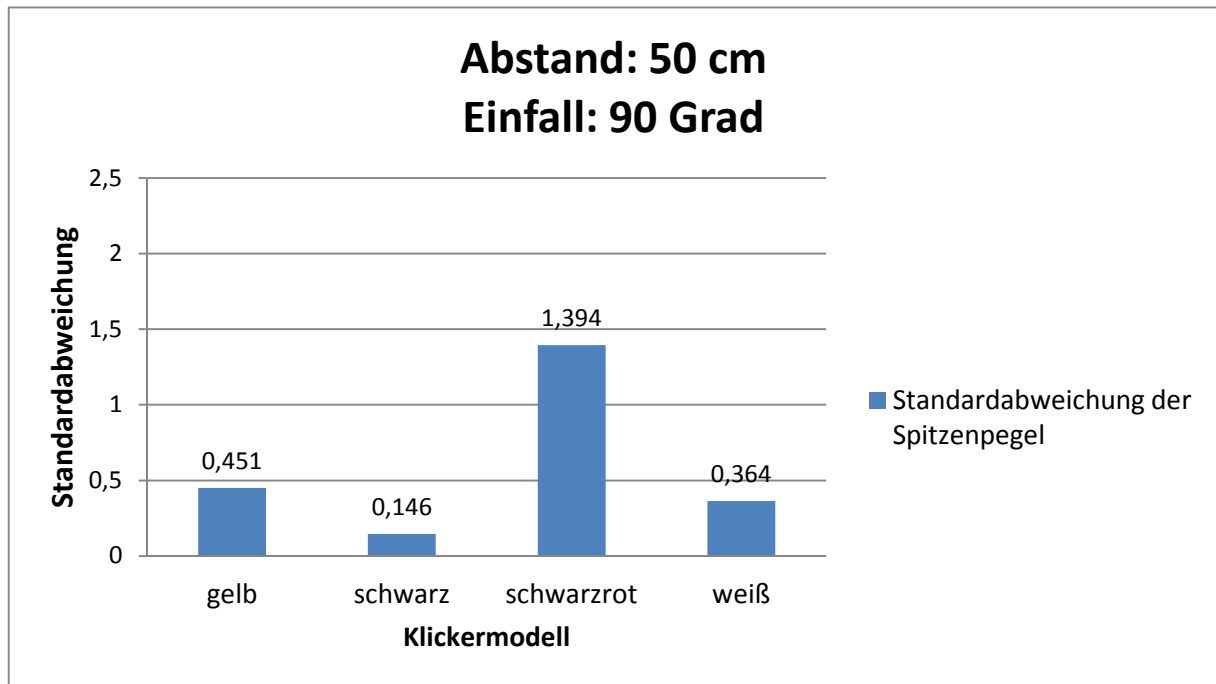


Abb. 40: Klicker, Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, 50 cm 90 Grad

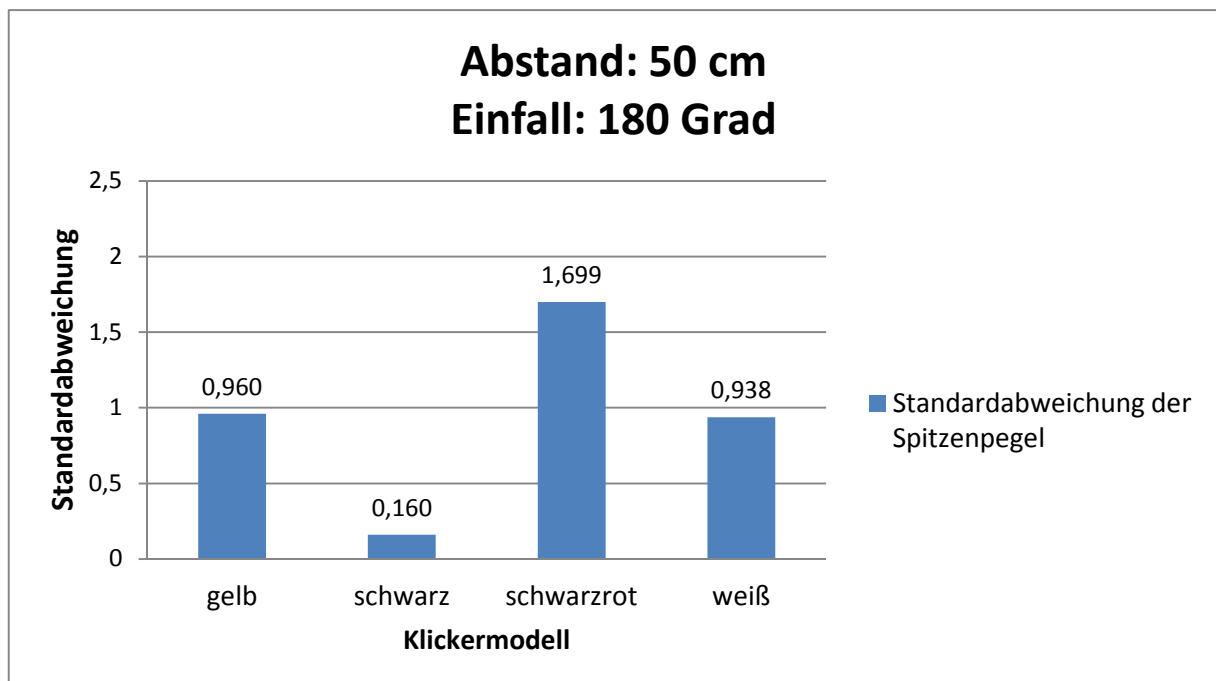


Abb. 41: Klicker, Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, 50 cm, 180 Grad

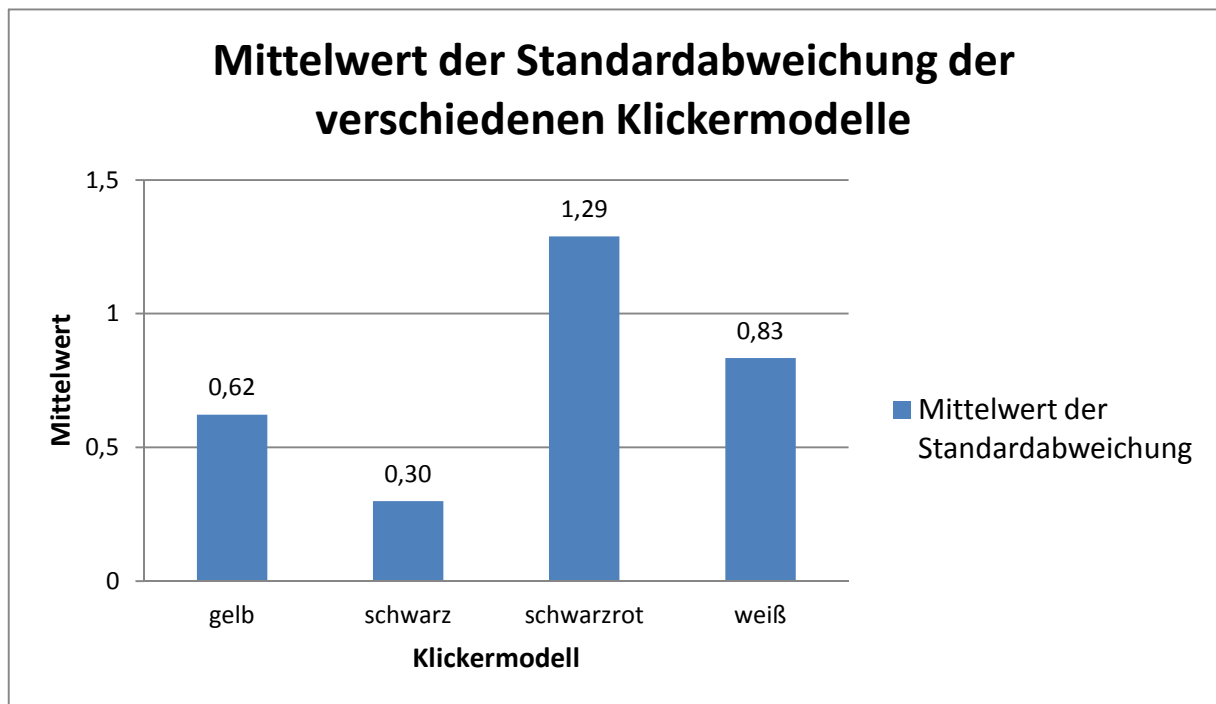


Abb. 42: Klicker, Mittelwerte der Standardabweichung

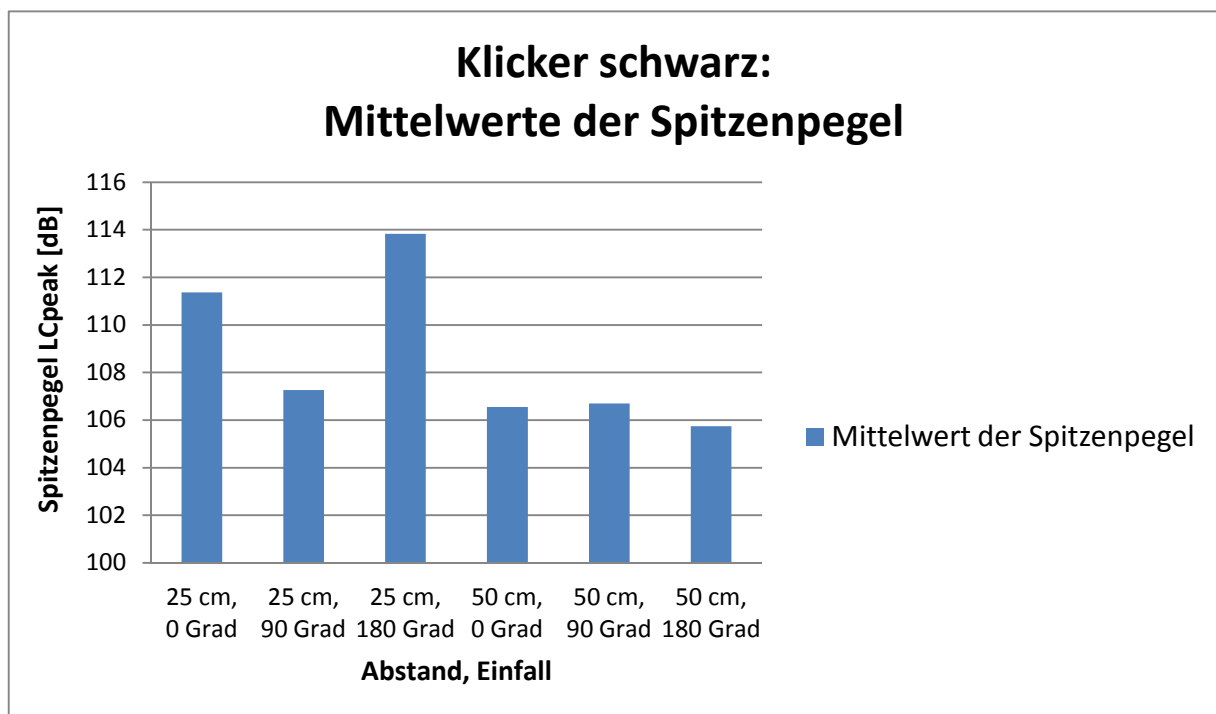


Abb. 43: Mittelwerte der Spitzenpegel des schwarzen Klickers bei viermaliger Messwiederholung

Bei Betrachtung der Mittelwerte der Standardabweichungen ist zu erkennen, dass der schwarze Klicker in Bezug auf den Spitzenpegel den geringsten Mittelwert der Standardabweichungen besitzt und somit der reproduzierbarste Klicker ist.

Tabelle 5: Werte der Spitzenpegel aller Klickermodelle in den verschiedenen Abständen und Einfallswinkeln

Abstand, Einfall	gelb	schwarz	schwarzrot	weiß
25 cm , 0 Grad	126,5	111,5	109,9	115,8
	126,4	112,3	110,3	116,5
	125,4	110,4	107,9	116,0
25 cm, 90 Grad	126,0	107,2	104,2	114,0
	126,5	107,3	103,9	110,4
	126,3	107,3	104,4	110,0
25 cm, 180 Grad	122,9	114,1	114,2	116,8
	121,7	113,7	110,7	117,7
	121,7	113,8	110,3	117,8
50 cm, 0 Grad	119,7	106,7	106,6	111,4
	119,5	106,3	105,5	111,5
	120,9	106,8	104,6	112,4
50 cm, 90 Grad	119,3	106,9	103,6	111,8
	119,8	106,6	104,1	112,4
	120,2	106,6	106,2	112,5
50 cm, 180 Grad	118,9	105,7	107,3	108,7
	118,4	105,9	104,3	109,5
	117,1	105,6	104,3	110,6

4.1.4 Spielzeugpistolen

Bei der Ergebnispräsentation ist die Standardabweichung der jeweils vier Messergebnisse dargestellt. Alle drei Spielzeugpistolen wurden jeweils vier Mal in 2 unterschiedlichen Abständen (50 cm und 1m) und drei unterschiedlichen Einfallswinkeln (0, 90 und 180 Grad) gemessen.

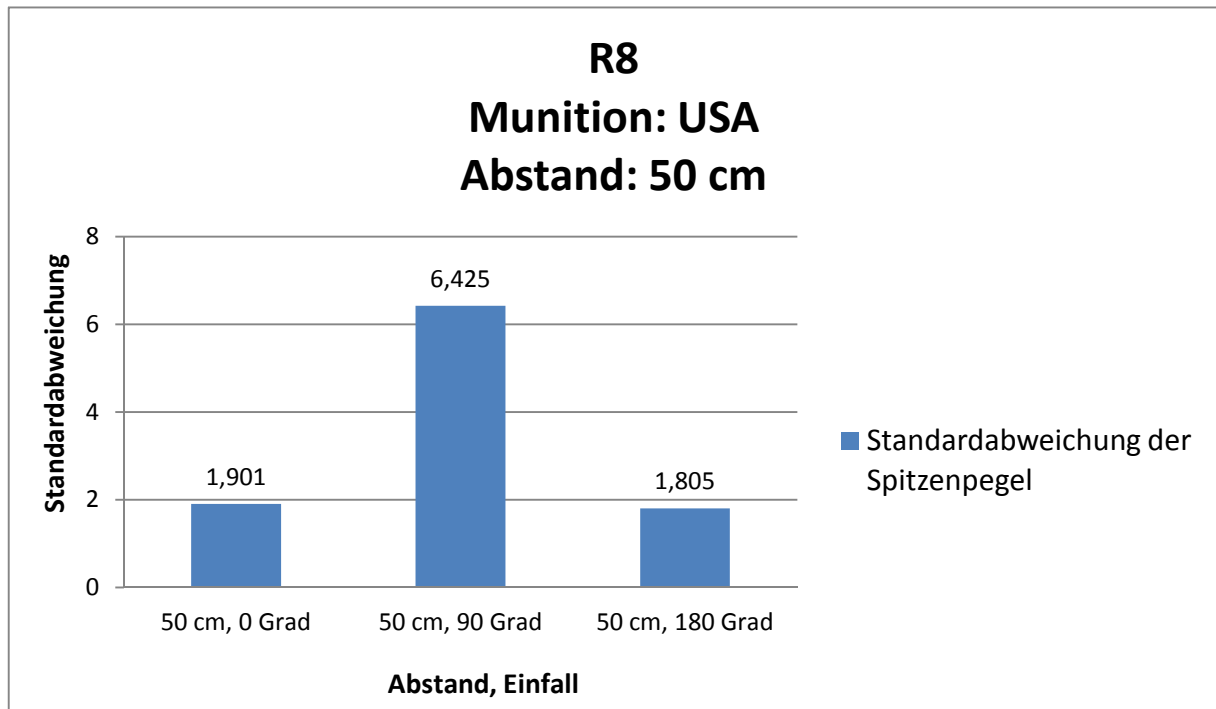


Abb. 44: Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, R8, Munition USA, 50 cm

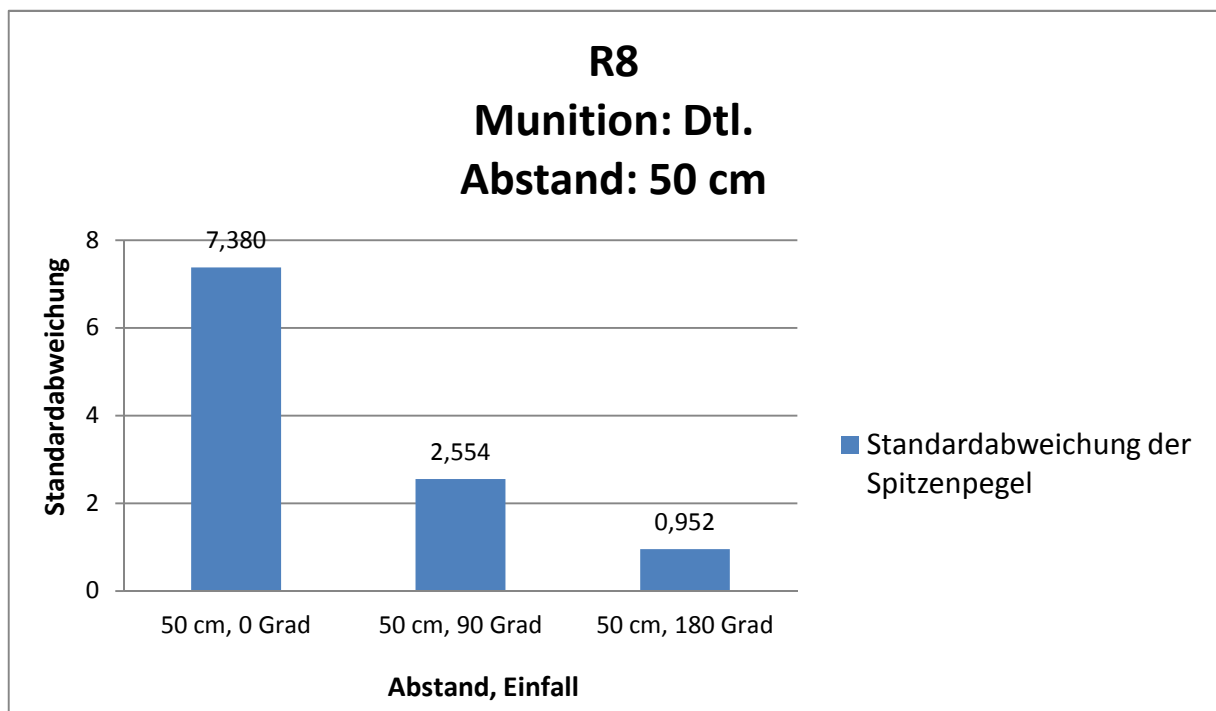


Abb. 45: Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, R8, Munition Dtl., 50 cm

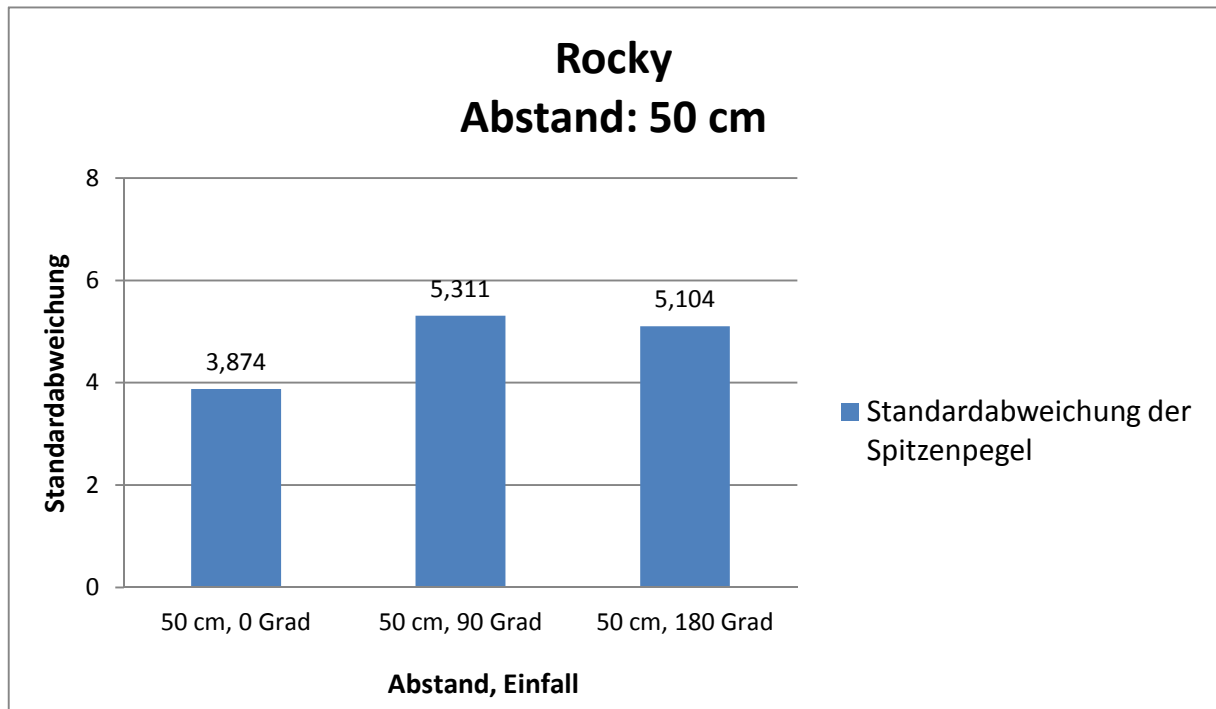


Abbildung 46: Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Rocky, 50 cm

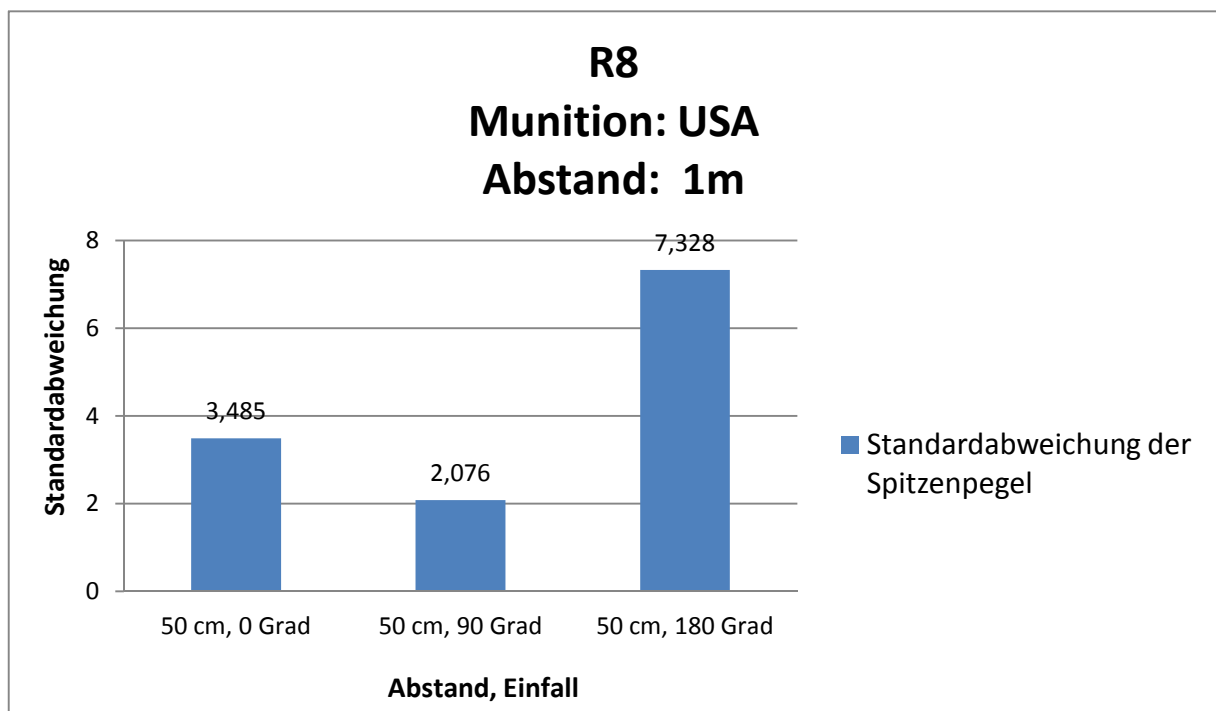


Abb. 47: Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, R8, Munition USA, 1m

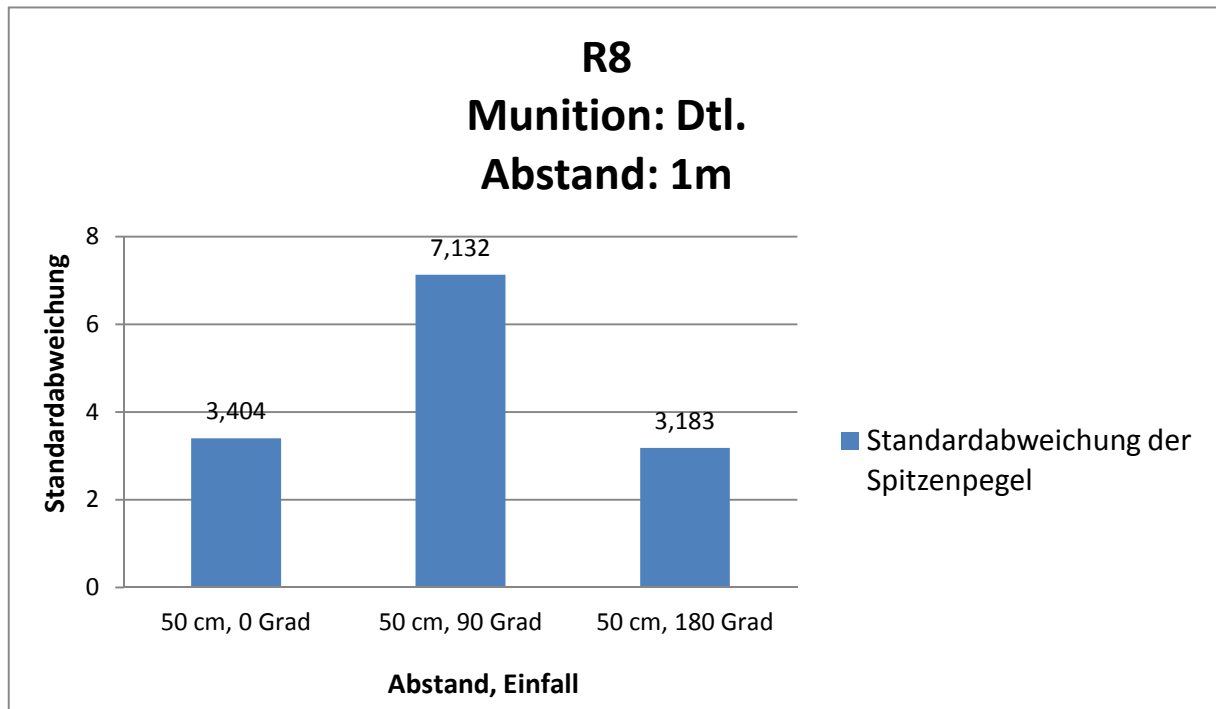


Abb. 48: Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, R8, Munition Dtl., 1m

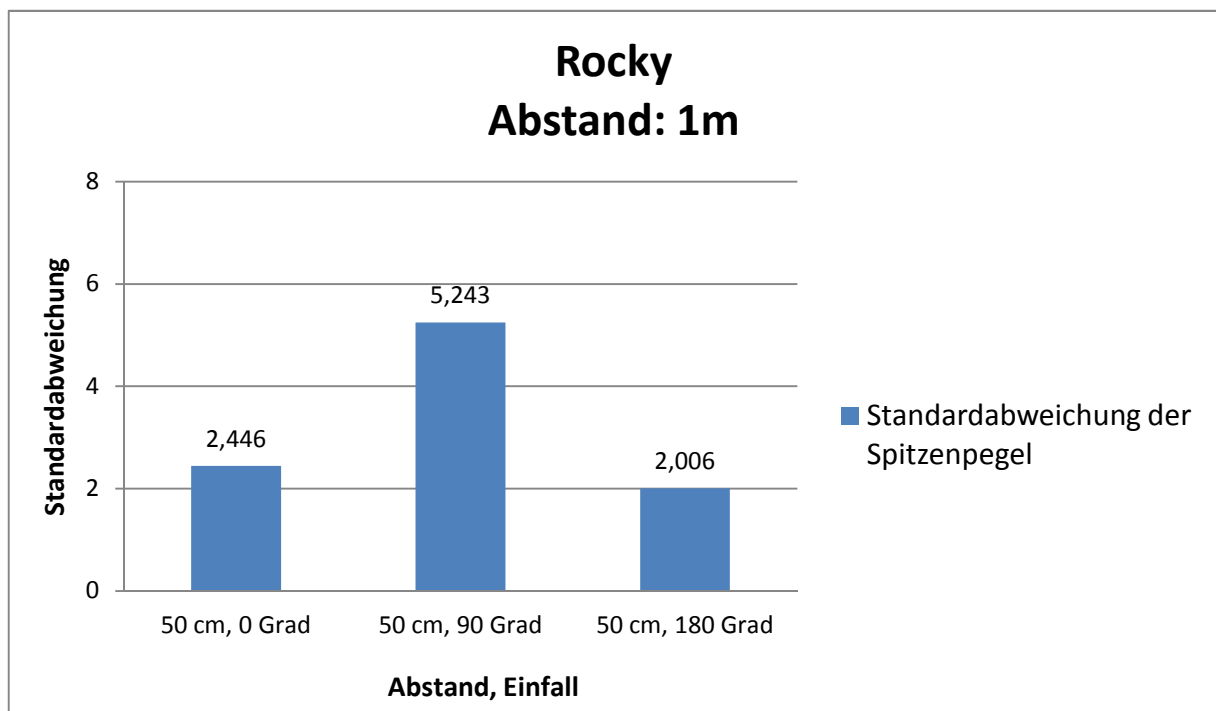


Abb. 49: Standardabweichung der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Rocky, 1m

Tabelle 6: Werte der Spitzenpegel der Spielzeugpistolen in allen verschiedenen Abständen und Einfallswinkeln

Abstand, Einfall	R8, USA	R8, Dtl.	Rocky
50 cm, 0Grad	140,7	127,0	122,3
	142,2	112,3	126,2
	144,9	126,1	116,9
	144,2	127,8	123,3
50 cm, 90 Grad	137,8	127,3	128,5
	126,0	129,8	127,5
	140,0	123,6	118,2
	138,4	127,8	119,6
50 cm, 180 Grad	134,4	131,8	115,1
	132,0	133,8	113,3
	135,8	131,8	122,8
	135,9	132,8	111,1
1m, 0 Grad	138,0	121,9	116,3
	131,6	120,7	114,0
	134,7	114,7	119,0
	139,4	116,4	113,7
1m, 90 Grad	134,7	117,1	116,0
	130,0	105,1	106,9
	130,8	122,1	119,2
	131,8	115,4	115,1
1m, 180 Grad	128,4	107,7	117,7
	128,5	108,7	121,9
	143,8	114,2	121,5
	131,3	113,0	119,2

Bei allen Spielzeugpistolen ist die Standardabweichung jeweils in mindestens einer getesteten Position größer als 5. Die Standardabweichung ist allgemein relativ hoch im Vergleich zu den anderen Referenzquellen. Die Spielzeugpistolen sind als reproduzierbare Referenzquelle eher ungeeignet. Es finden sich immer wieder Ausreißer in den einzelnen Messungen, was damit zu erklären ist, dass die Munition mit einer unterschiedlichen Menge an Pulver behaftet ist. Je mehr Pulver in einer Munitionskammer vorhanden, desto lauter der Knall. In der Herstellung der Munition werden die kleinen Pulverunterschiede vernachlässigt. Es lässt sich weder zu den verschiedenen Einfallswinkeln noch zu den verschiedenen Abständen eine Aussage über die Konstanz der Ergebnisse machen. Durch die vielen Ausreißer gibt es keine nachvollziehbare Struktur der Messergebnisse.

4.1.5 Schreckschusspistole

Die Messungen der Schreckschusspistole wurden im Freien durchgeführt.

Es wurden jeweils fünf Messungen in den Abständen 2 und 4 Meter, sowie in den Einfallswinkeln 0 und 90 Grad durchgeführt.

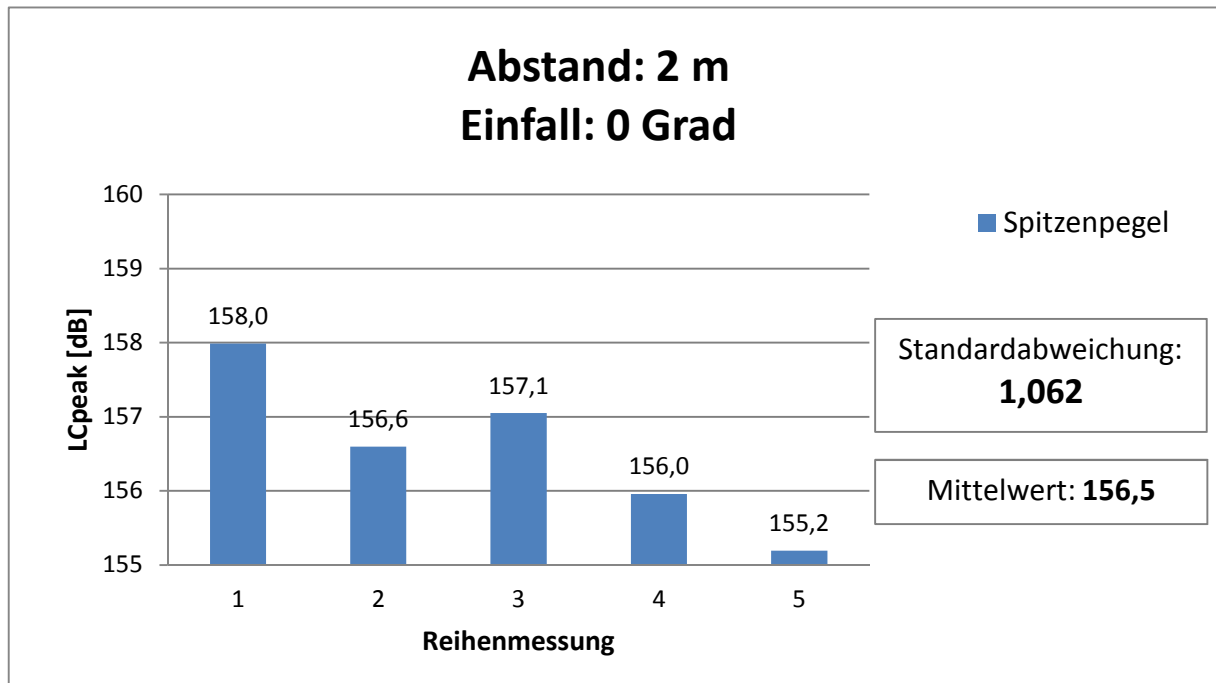


Abb. 50: Spitzenpegel bei fünfmaliger Messwiederholung, Schreckschusspistole, 2m, 0 Grad

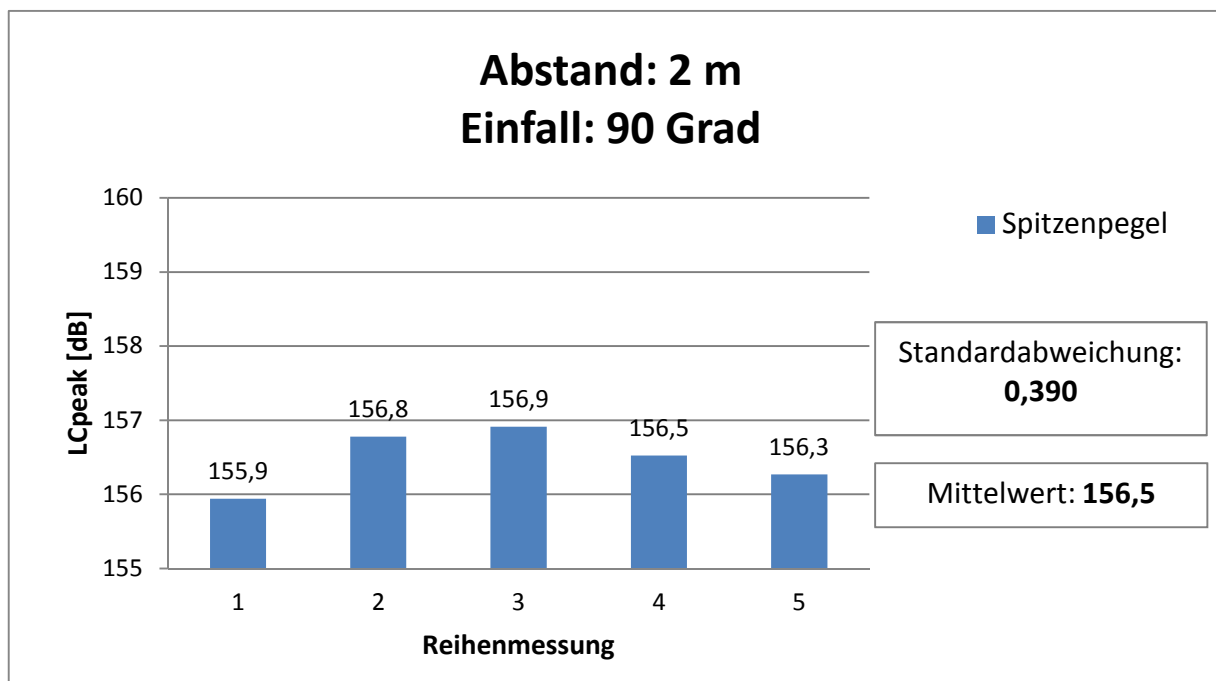


Abb. 51: Spitzenpegel bei fünfmaliger Messwiederholung, Schreckschusspistole, 2m, 90 Grad

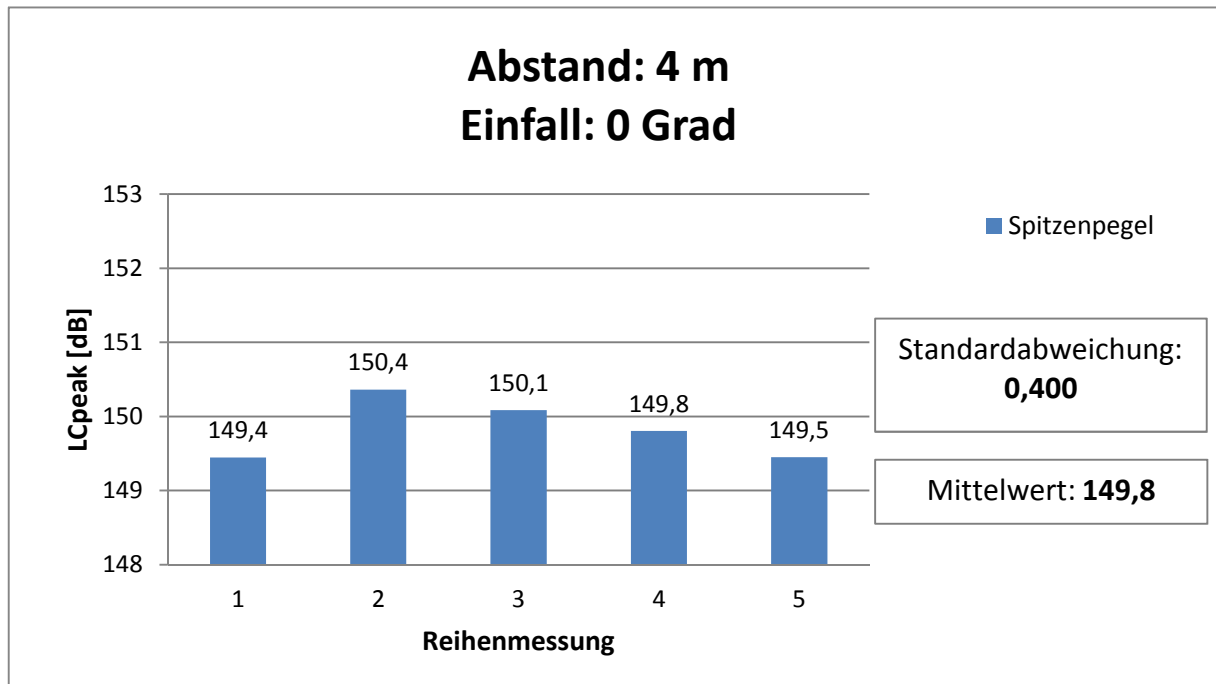


Abb. 52: Spitzenpegel bei fünfmaliger Messwiederholung, Schreckschusspistole, 4m, 0 Grad

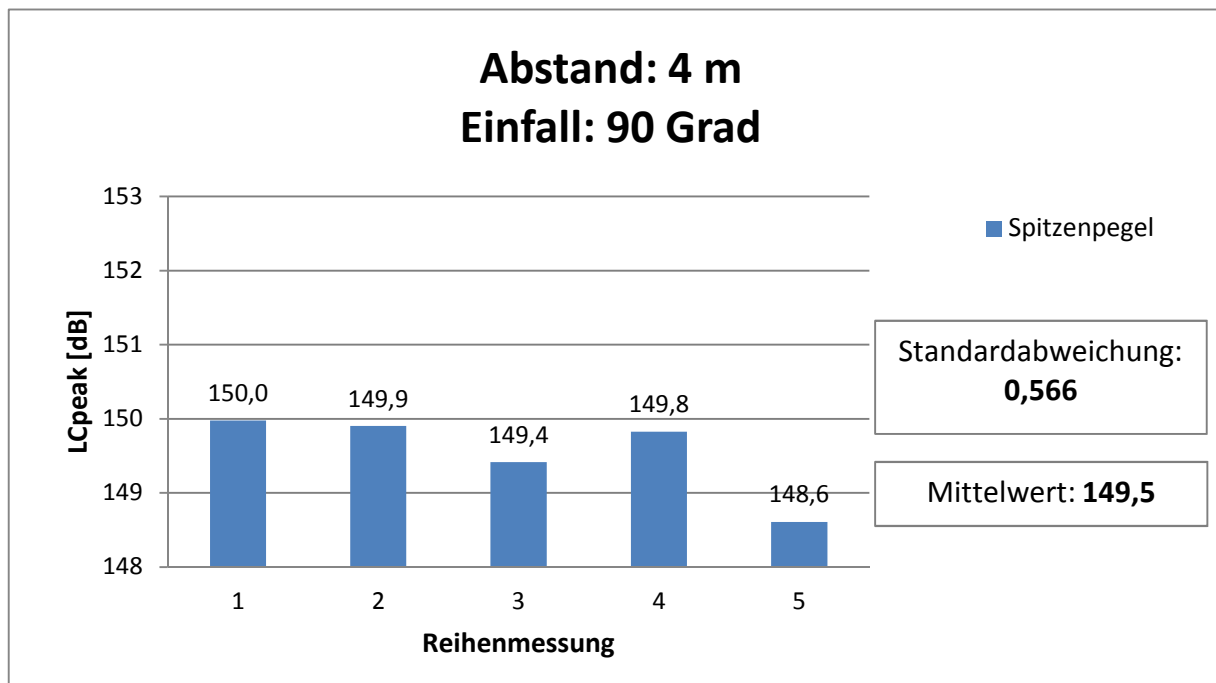


Abb. 53: Spitzenpegel bei fünfmaliger Messwiederholung, Schreckschusspistole, 4m, 90 Grad

Die Ergebnisse sind in allen vier Messeinheiten sehr reproduzierbar. Die Standardabweichung beträgt in drei Messeinheiten unter 0,5 und einmal ungefähr 1,0. Es lässt sich sagen, dass die Schreckschusspistole bei unterschiedlichen Einfallswinkeln und unterschiedlichen Abständen ein nahezu konstantes und somit reproduzierbares Ergebnis liefert.

4.2 C- Duration

Zu den wichtigen Knallcharakteristika gehören neben dem Spitzendruck die Wirkzeit. Um einen Knall richtig beschreiben zu können, muss die Wirkzeit bestimmt werden. In Deutschland wird diese „Wirkzeit nach Pfander“ oder auch „C- Duration“ genannt (vgl 3.1). Im Folgenden sind die Mittelwerte und Standardabweichungen der Wirkzeiten der einzelnen Referenzquellen dargestellt. Hier interessiert neben der Reproduzierbarkeit der einzelnen Referenzquellen auch die Knallcharakteristika. Zu beachten ist bei der Betrachtung der Graphen die unterschiedliche Skalierung der y- Achse.

5.2.1 Klappe schwarz

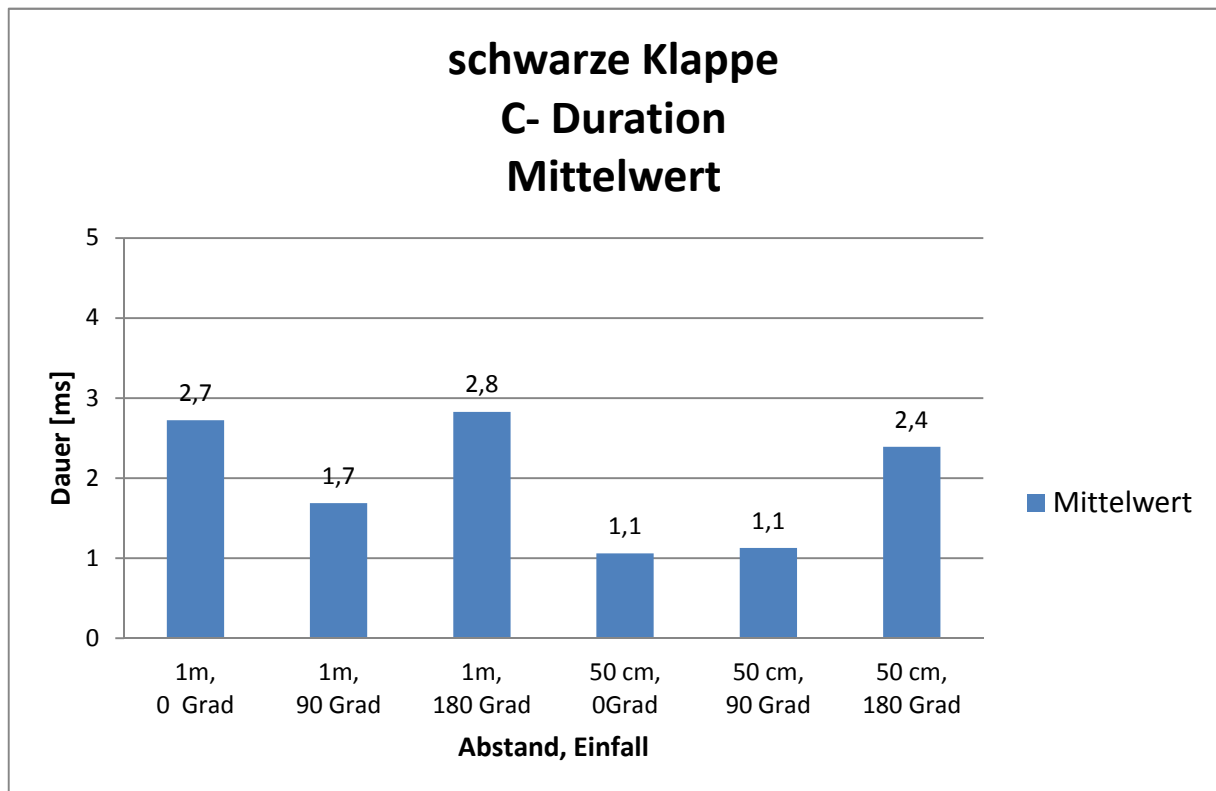


Abb. 54: Mittelwerte der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz

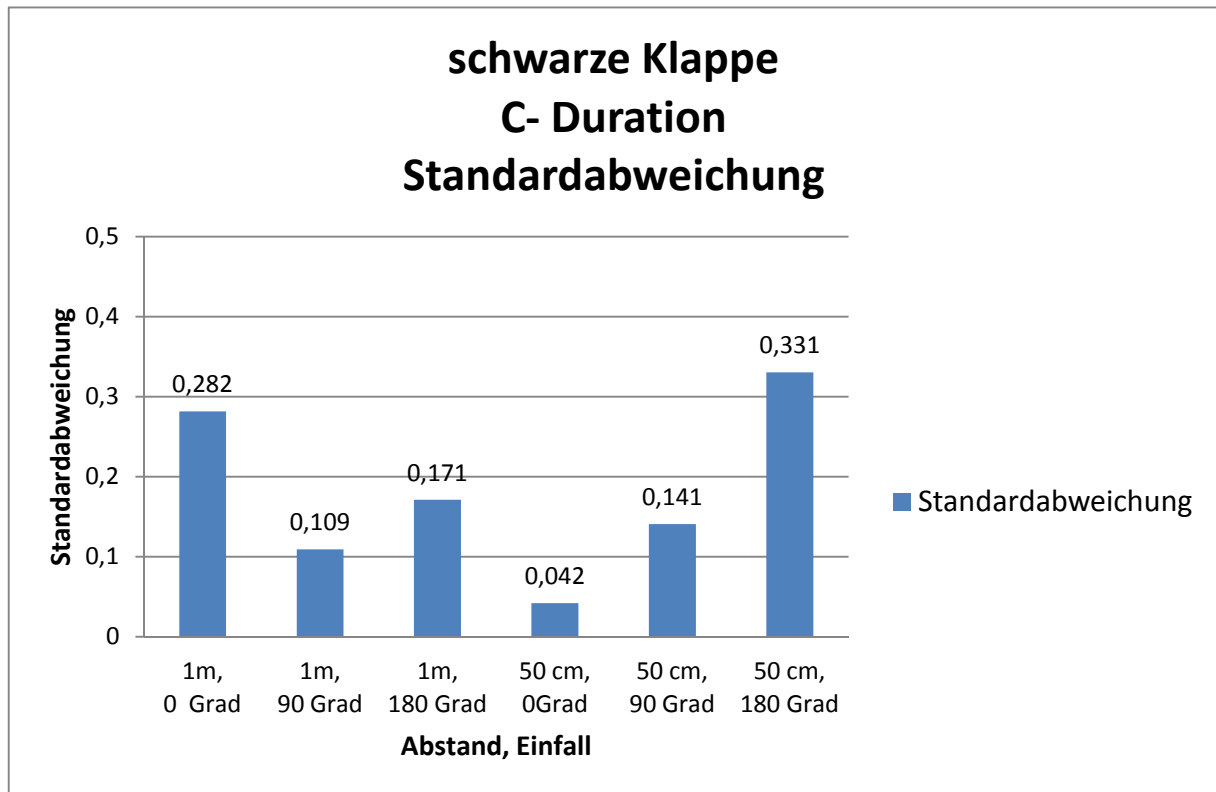


Abb. 55: Standardabweichung der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz

Die Wirkzeiten der schwarzen Klappe sind je nach Abstand und Einfallswinkel zwischen 1,1 ms und 2,8 ms und die Standardabweichung zwischen 0,042 und 0,331.

5.2.2 Klappe hell

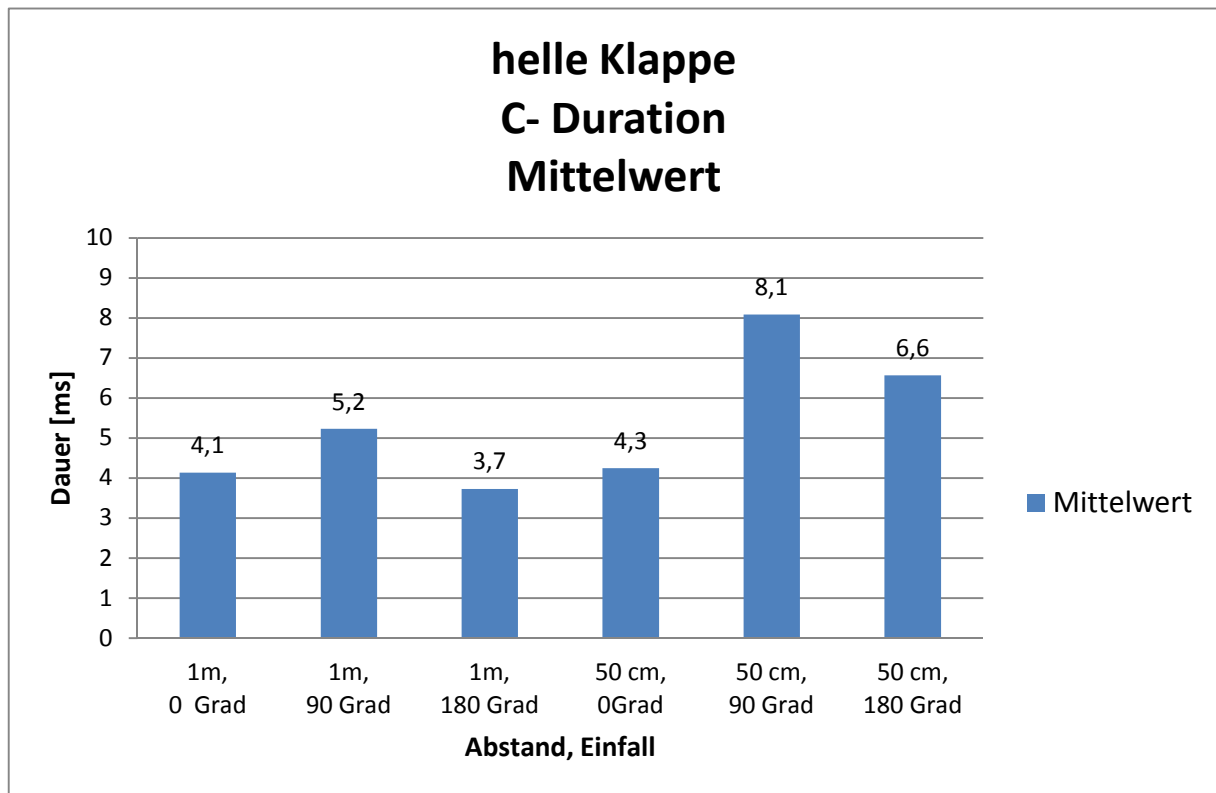


Abb. 56: Mittelwerte der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Klappe hell

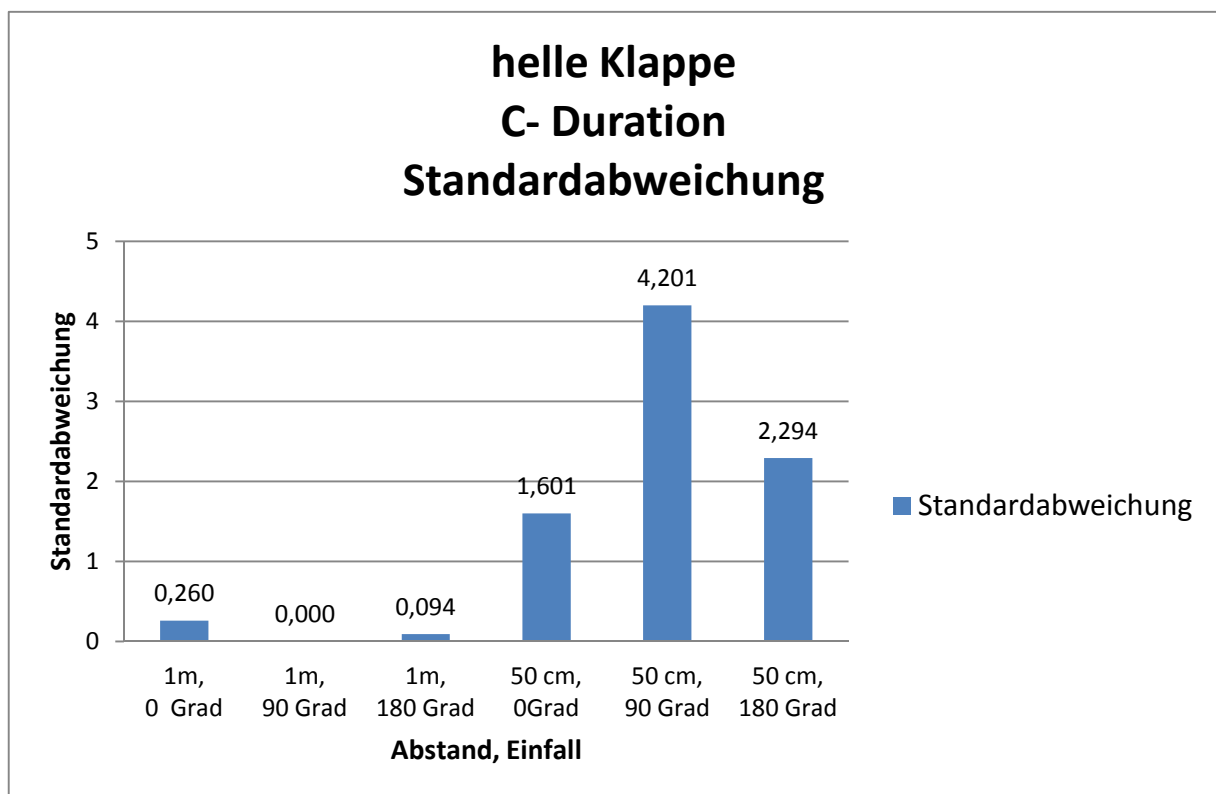


Abb. 57: Standardabweichung der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Klappe hell

Die Wirkzeiten der hellen Klappe sind je nach Abstand und Einfallswinkel zwischen 3,7 ms und 8,1 ms und die Standardabweichung zwischen 0,000 und 4,201. Im Vergleich zur schwarzen Klappe ist die Wirkzeit der weißen Klappe länger und die Standardabweichung weniger konstant.

4.2.3 Klicker

Bei den vier Referenzklickern hat sich der schwarz Klicker als der „reproduzierbarste“ herausgestellt. Deshalb wurden die restlichen Klicker hier weggelassen.

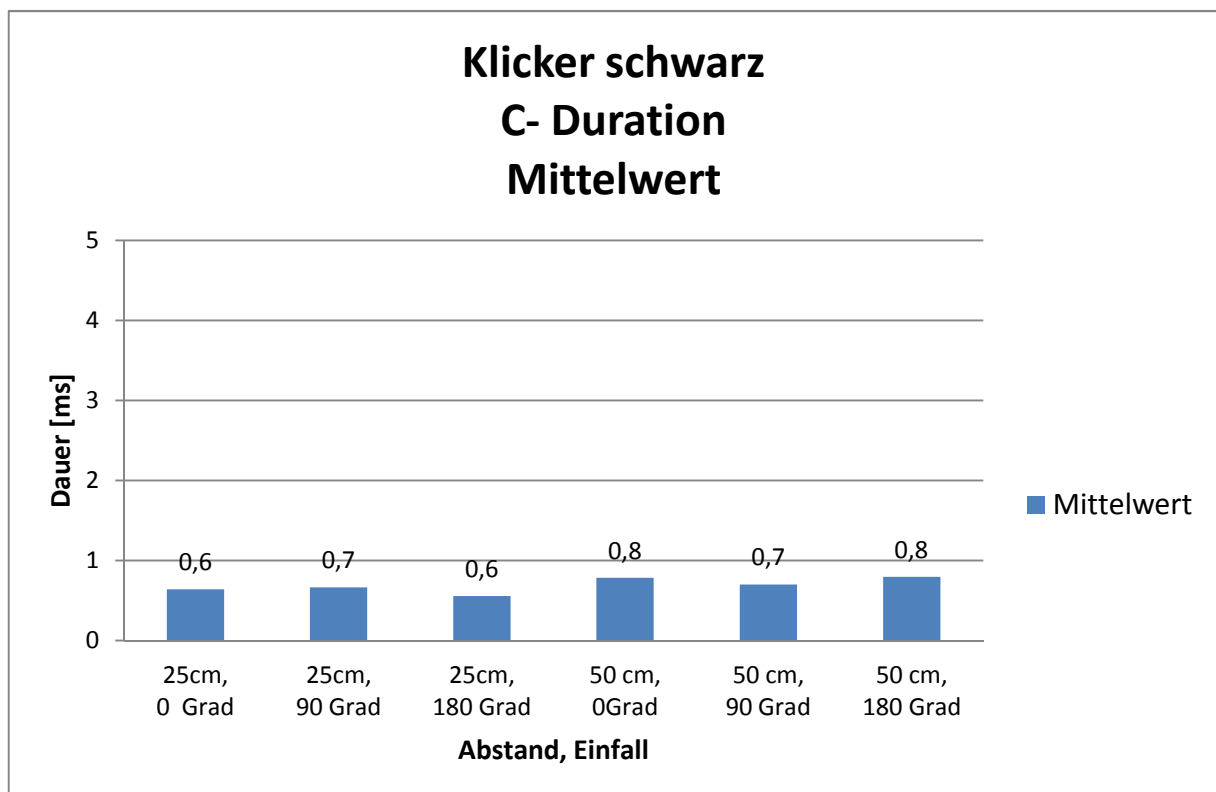


Abb. 58: Mittelwerte der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Klicker schwarz

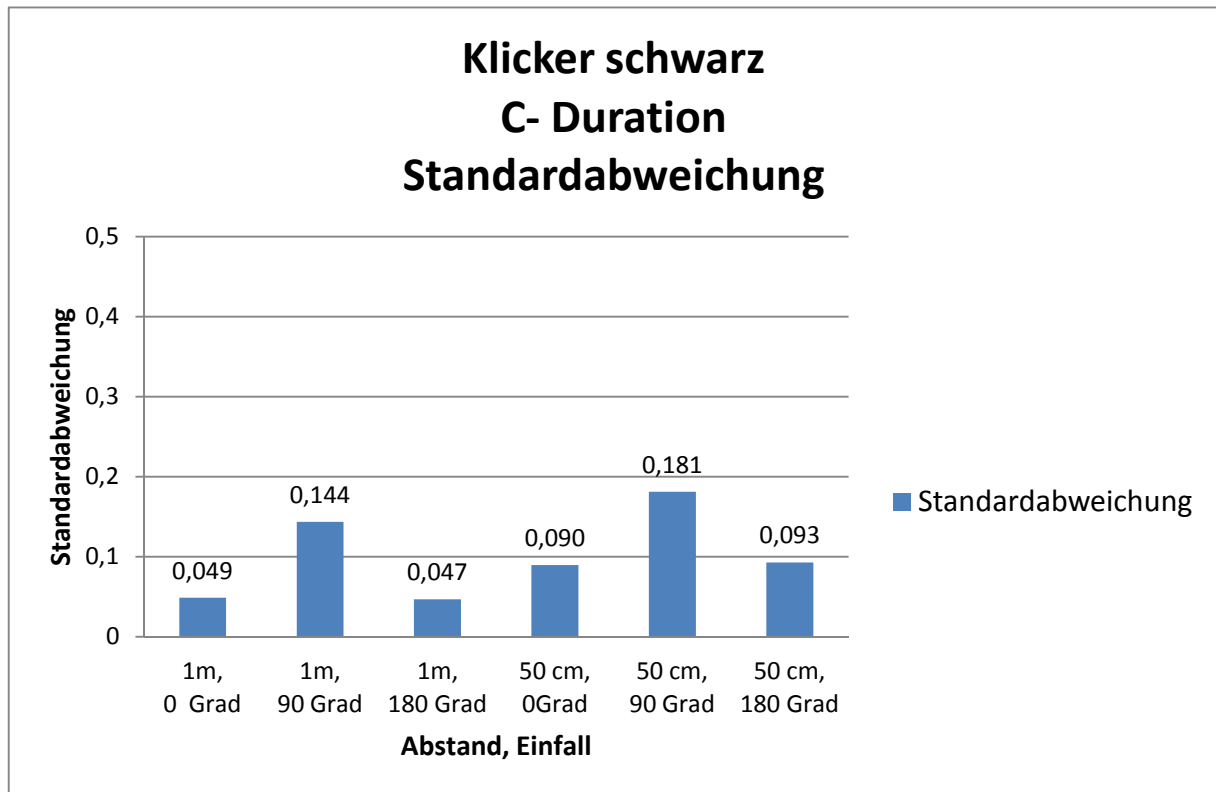


Abb. 59: Standardabweichung der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Klicker schwarz

Die Wirkzeiten des schwarzen Klickers sind je nach Abstand und Einfallswinkel zwischen 0,6 ms und 0,8 ms und damit relativ konstant. Die Standardabweichung ist zwischen 0,047 und 0,181 und damit sehr gering.

4.2.4 Spielzeugpistole

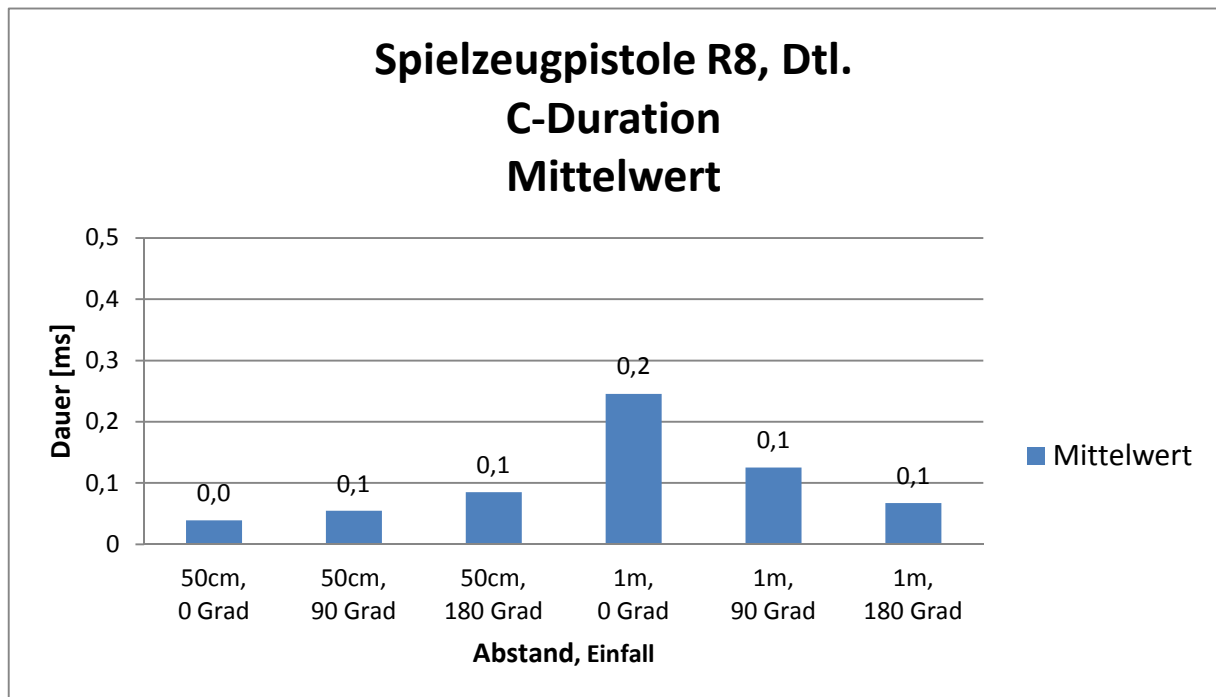


Abb. 60: Mittelwerte der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Spielzeugpistole R8, Dtl.

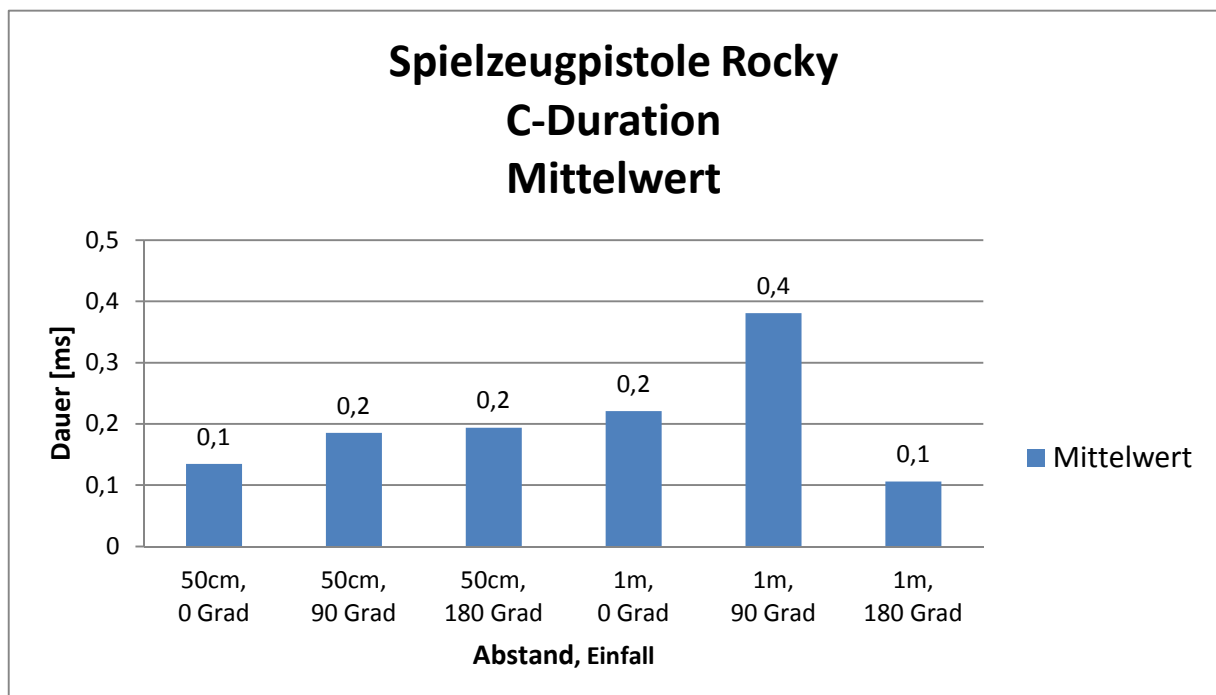


Abb. 61: Mittelwerte der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Spielzeugpistole Rocky

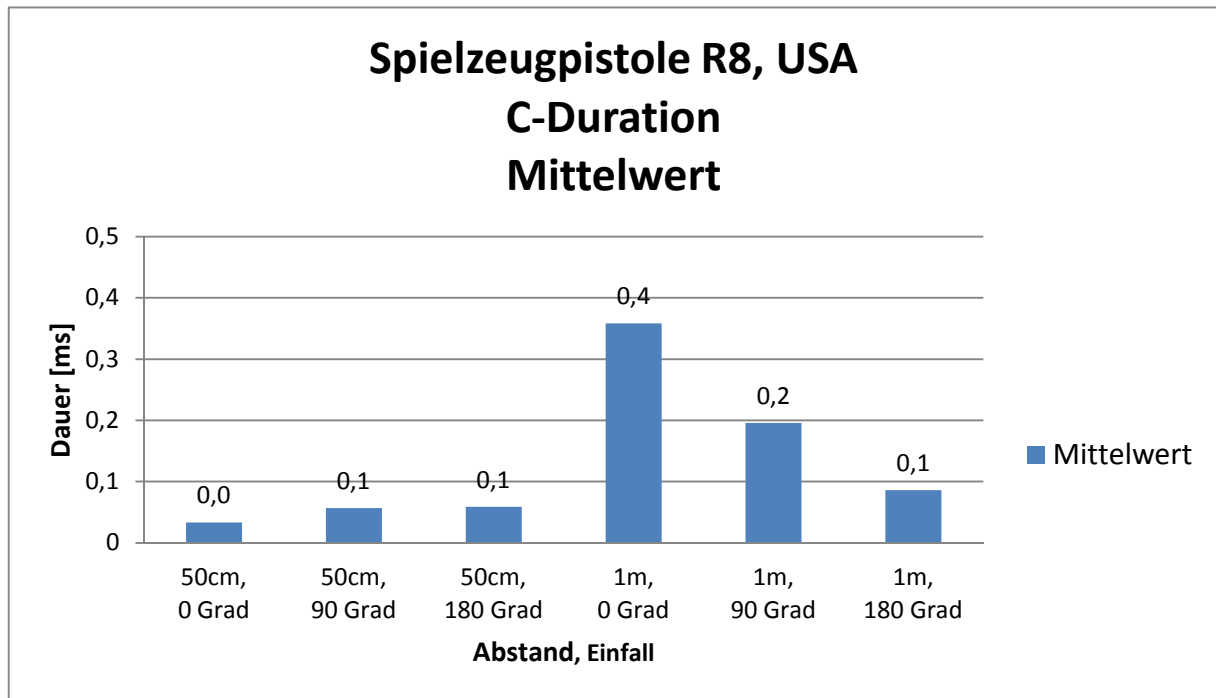


Abb. 62: Mittelwerte der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Spielzeugpistole R8, USA

Die Wirkzeiten der drei Spielzeugpistolen sind mit Mittelwerten zwischen 0,0 ms und 0,4 ms sehr gering. Aufgrund der kurzen Knalldauer wurde hier bei der Messung der Besselfilter entfernt, da sich zeigte, dass die Wirkung des Filters von der Duration abhängig ist (vgl. 4.2.3).

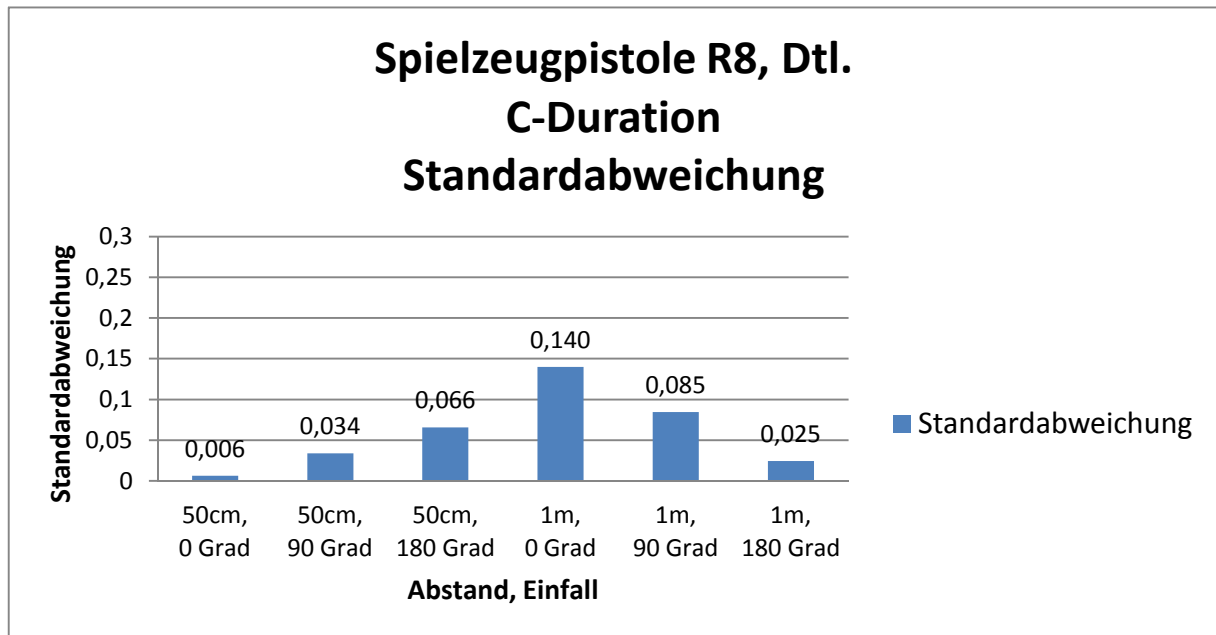


Abb. 63: Standardabweichung der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Spielzeugpistole R8, Dtl

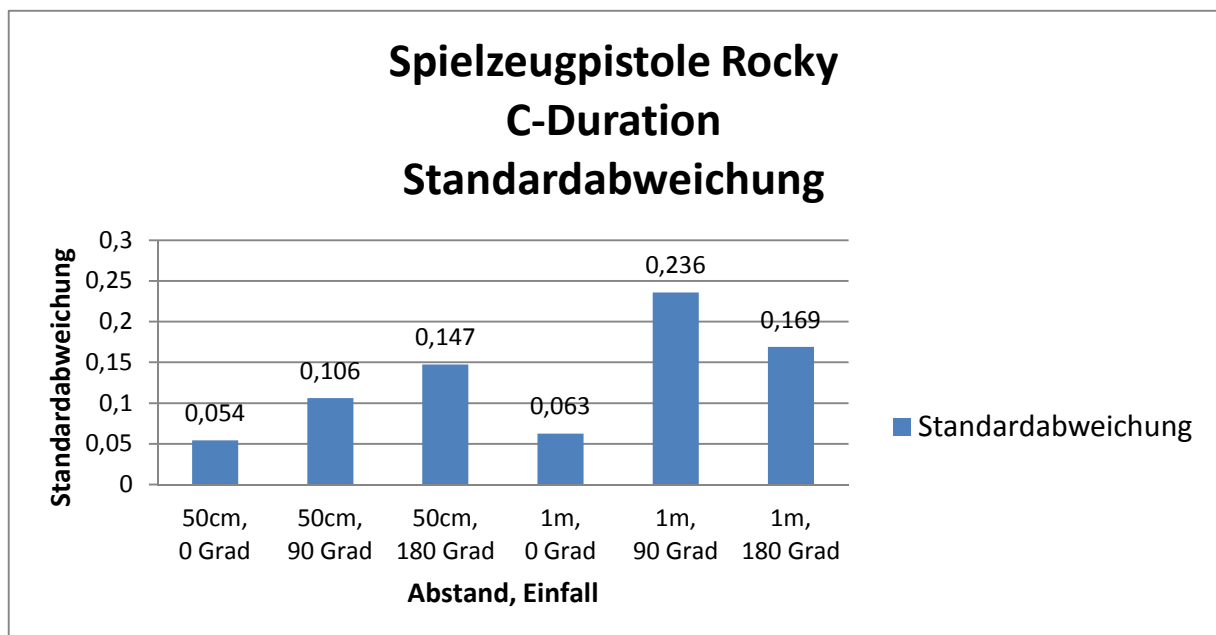


Abb. 64: Standardabweichung der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Spielzeugpistole Rocky

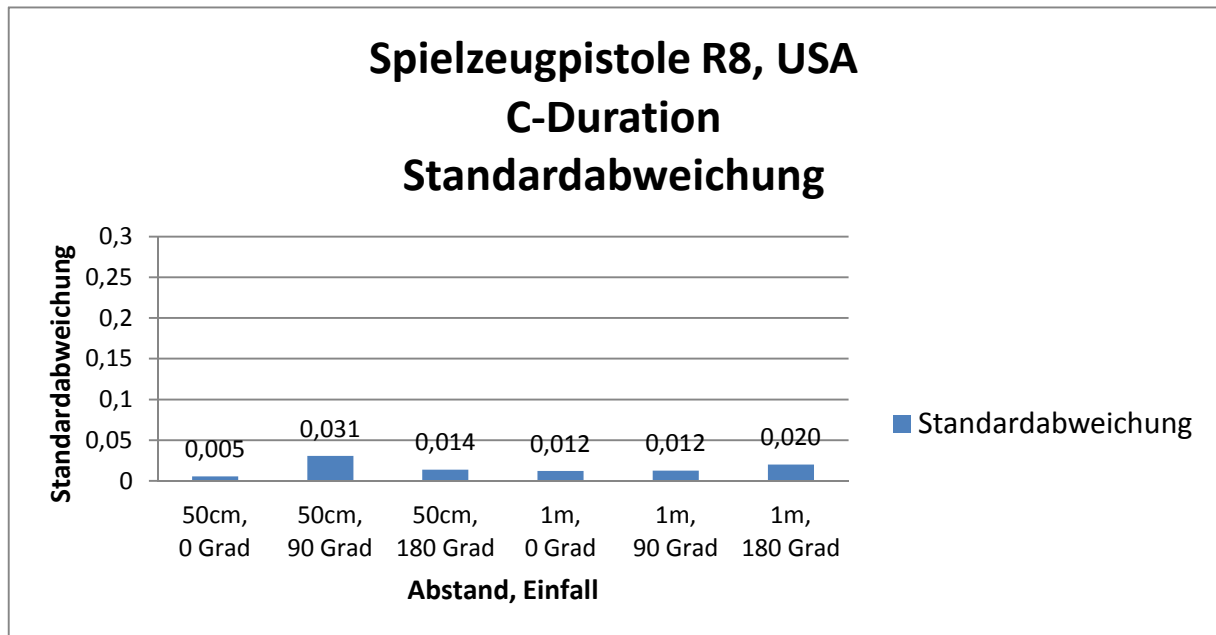


Abb. 65: Standardabweichung der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Spielzeugpistole R8, USA

Die Standardabweichungen der drei Spielzeugpistolen betragen zwischen 0,005 und 0,236. Im Gegensatz zum Spitzenpegel sind die Standardabweichungen hier relativ konstant.

4.2.5 Schreckschusspistole

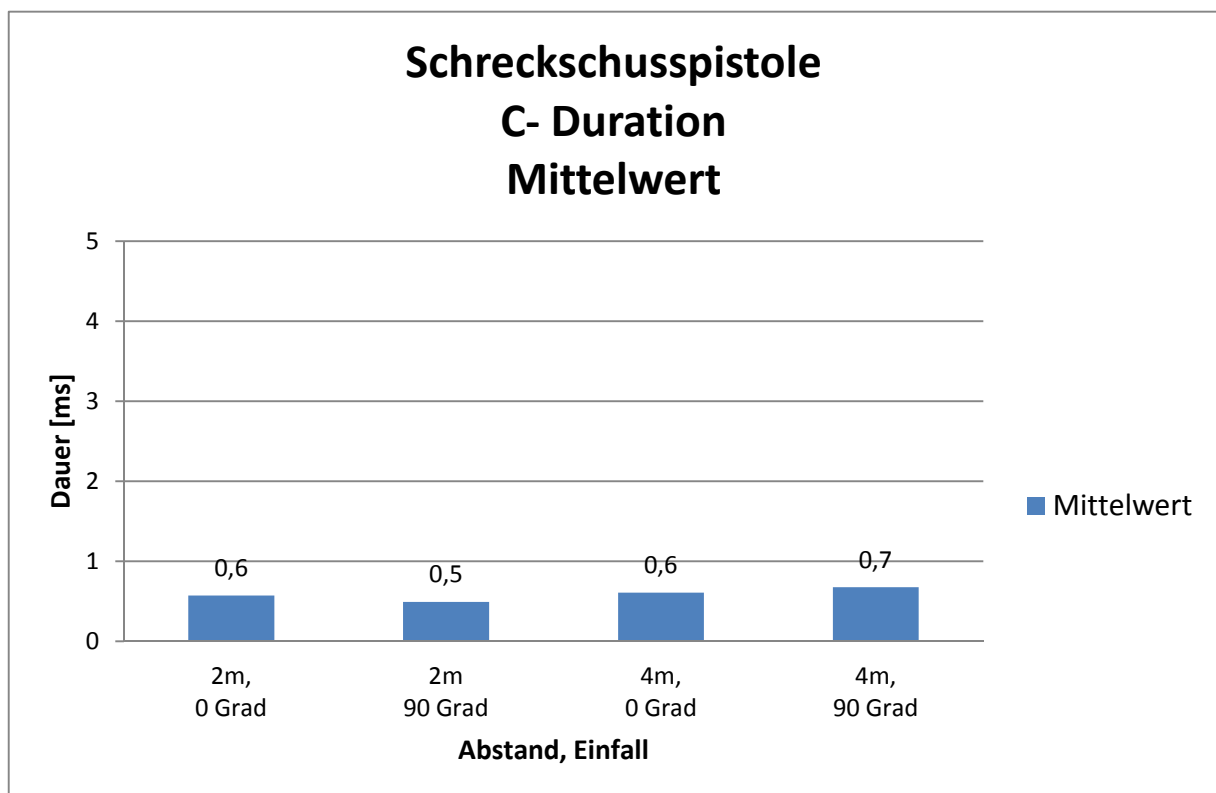


Abb. 66: Mittelwerte der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Schreckschusspistole

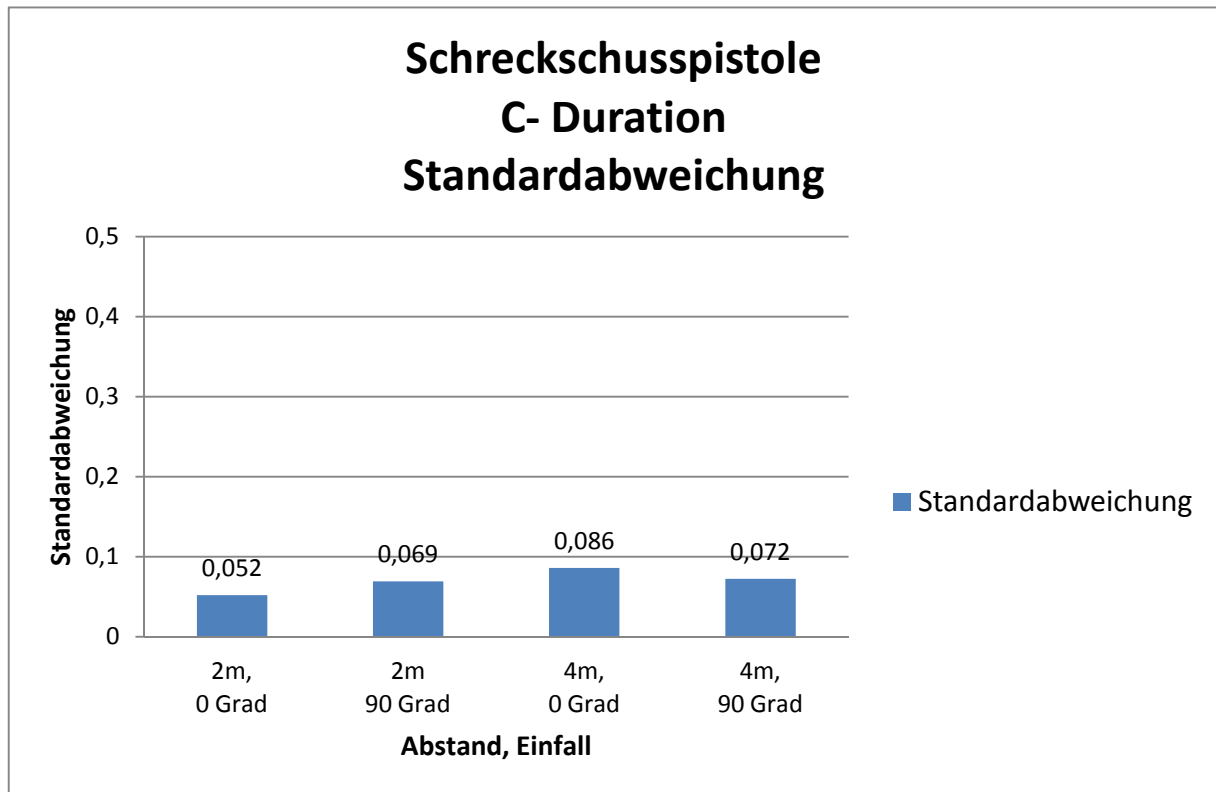


Abb. 67: Standardabweichung der C-Duration bei viermaliger Messwiederholung, Schreckschusspistole

Die Wirkzeiten der Schreckschusspistole sind je nach Abstand und Einfallswinkel zwischen 0,5 ms und 0,7 ms und damit relativ gering. Die Standardabweichung liegt zwischen 0,052 und 0,086.

4.3 Frequenzanalyse

Um den Schall zeitlich und spektral darstellen zu können, führt Labview eine Terzanalyse durch (vgl. 4.2). Diese Frequenzanalyse der Knallquellen gibt neben der C-Duration Aufschluss über die Knallcharakteristik.

4.3.3 Klappe schwarz

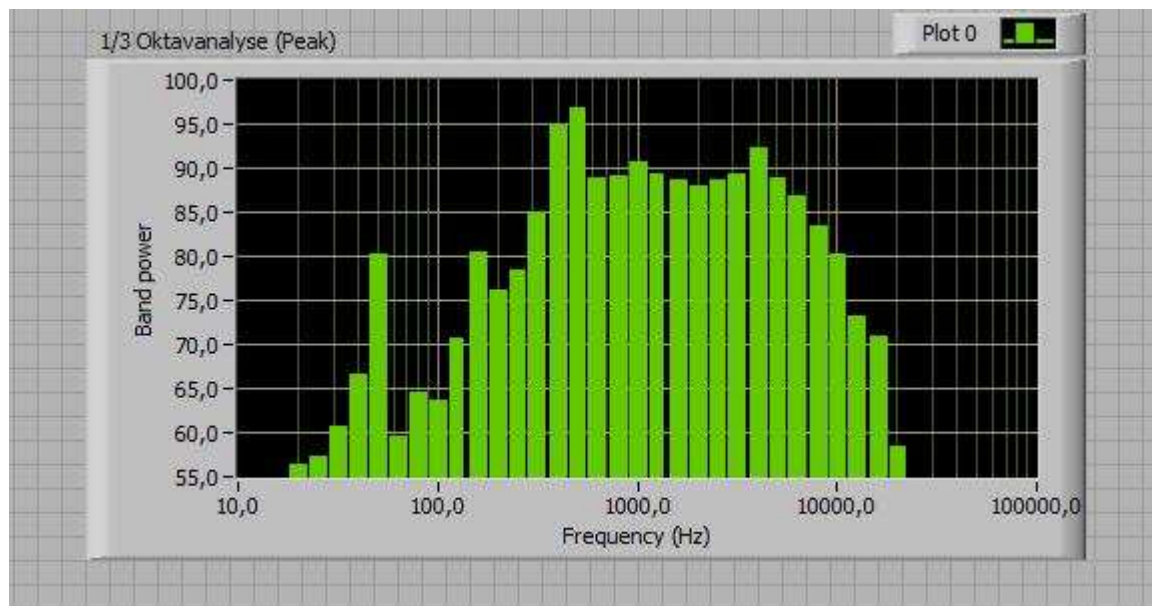


Abb. 68: Terzanalyse Klappe Schwarz

Die schwarze Klappe besitzt beim Knall einen größeren hochfrequenten Anteil. Das Hauptfrequenzspektrum liegt zwischen 500 Hz und 8000 Hz.

4.3.2 Klappe hell

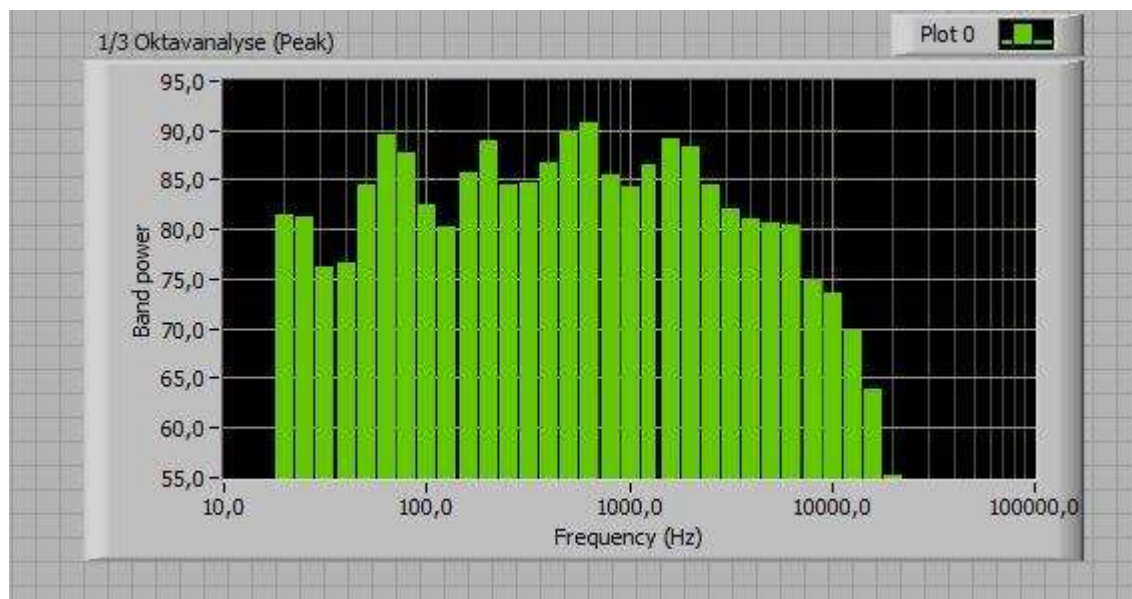


Abb. 69: Terzanalyse Klappe hell

Die helle Klappe besitzt beim Knall sowohl einen hochfrequenten als auch einen tieffrequenten Anteil. Die Frequenzcharakteristik ist somit breitbandiger als die der schwarzen Klappe.

4.3.3 Klicker

1. Klicker schwarz

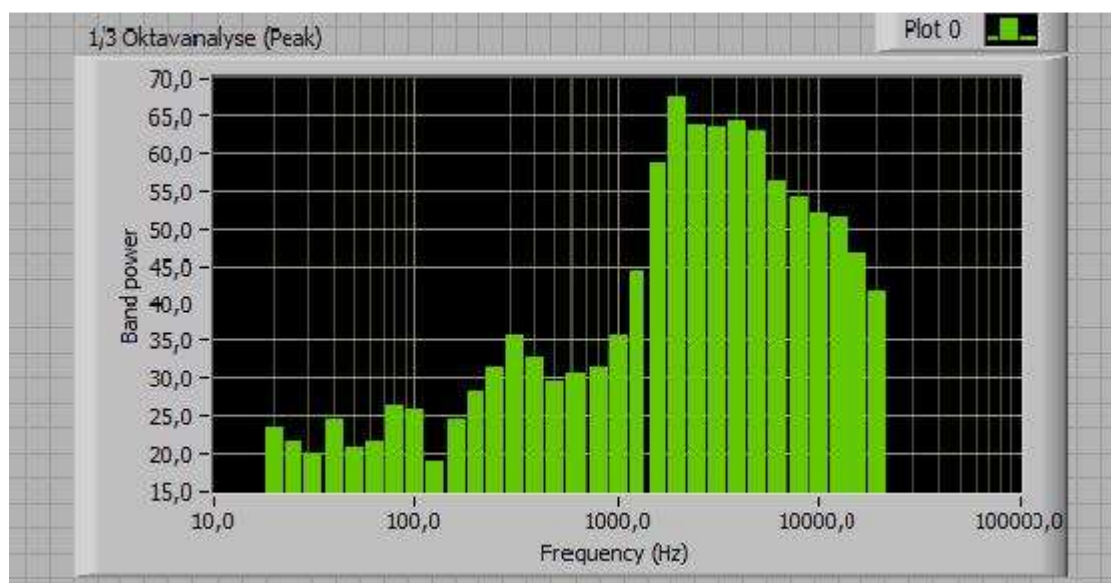


Abb. 70: Terzanalyse Klicker Schwarz

2. Klicker gelb

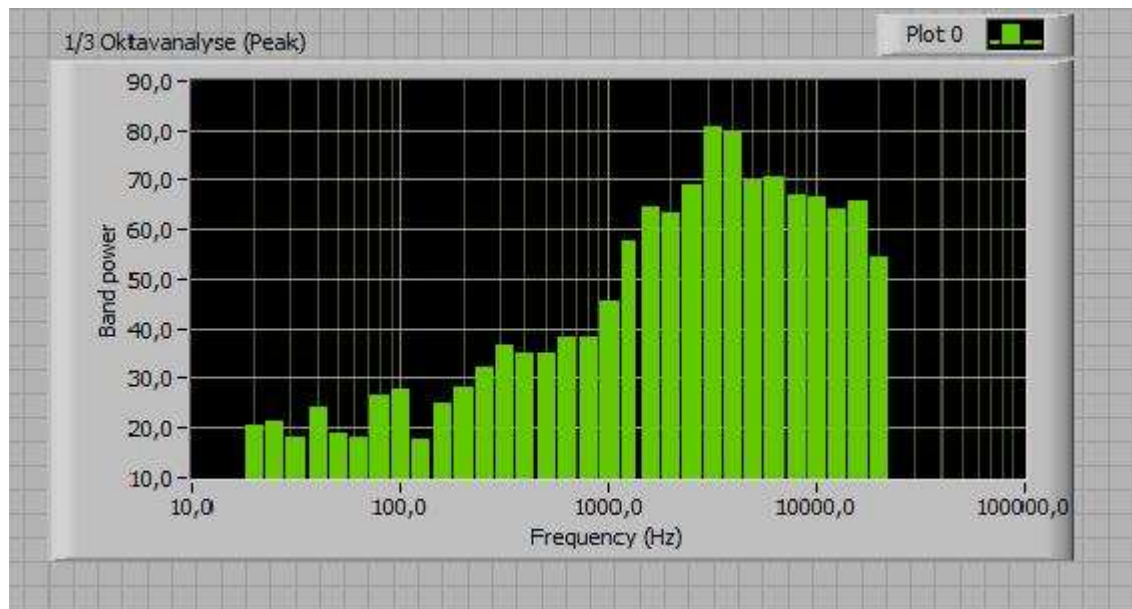


Abb. 71: Terzanalyse Klicker gelb

3. Klicker schwarzrot

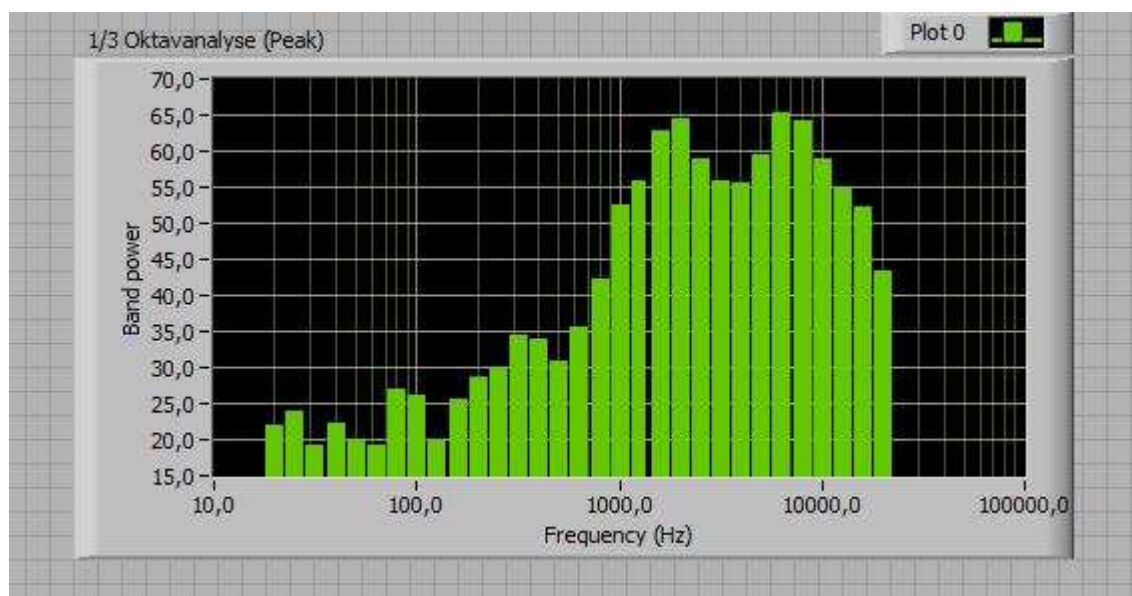


Abb. 72: Terzanalyse Klicker schwarzrot

4. Klicker weiß

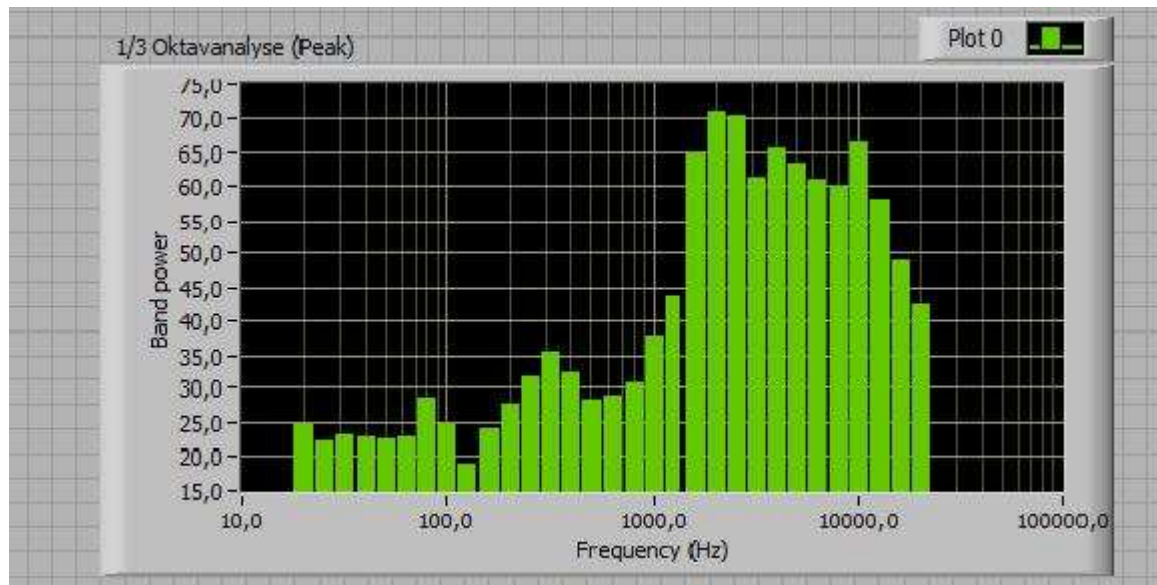


Abb. 73: Terzanalyse Klicker weiß

Die Frequenzcharakteristik der vier Klicker ist sehr ähnlich. Alle besitzen einen größeren hochfrequenten Anteil. Die Hauptfrequenzspektren liegen zwischen 2000 Hz und 10000 Hz.

4.3.4 Spielzeugpistole

1. Spielzeugpistole R8, Munition: Deutschland

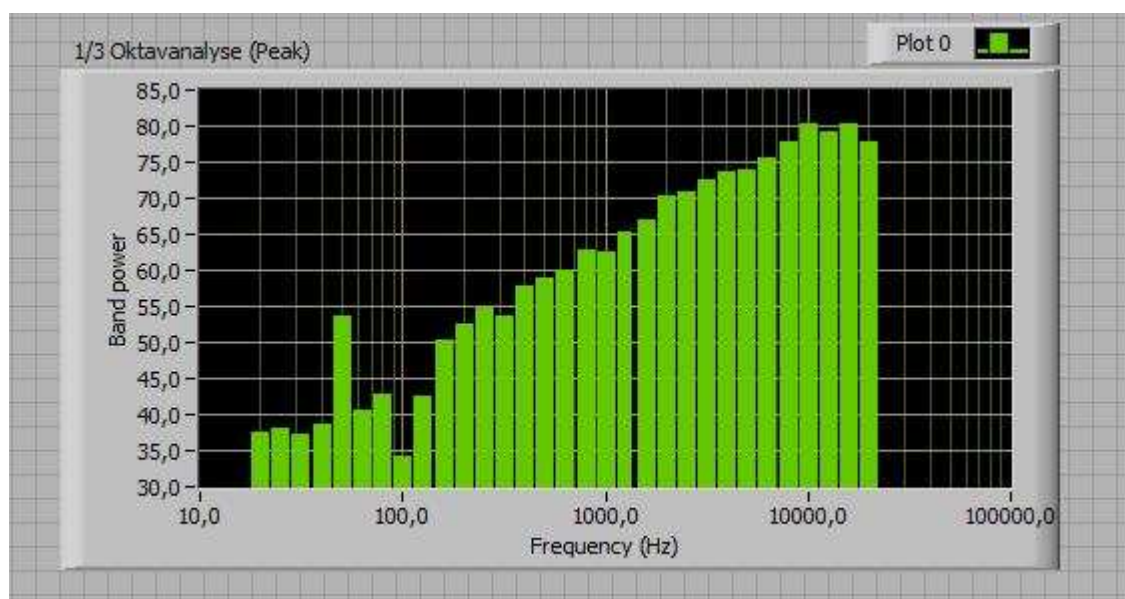


Abb. 74: Terzanalyse Spielzeugpistole R8, Dtl.

2. Spielzeugpistole Rocky, Munition: USA

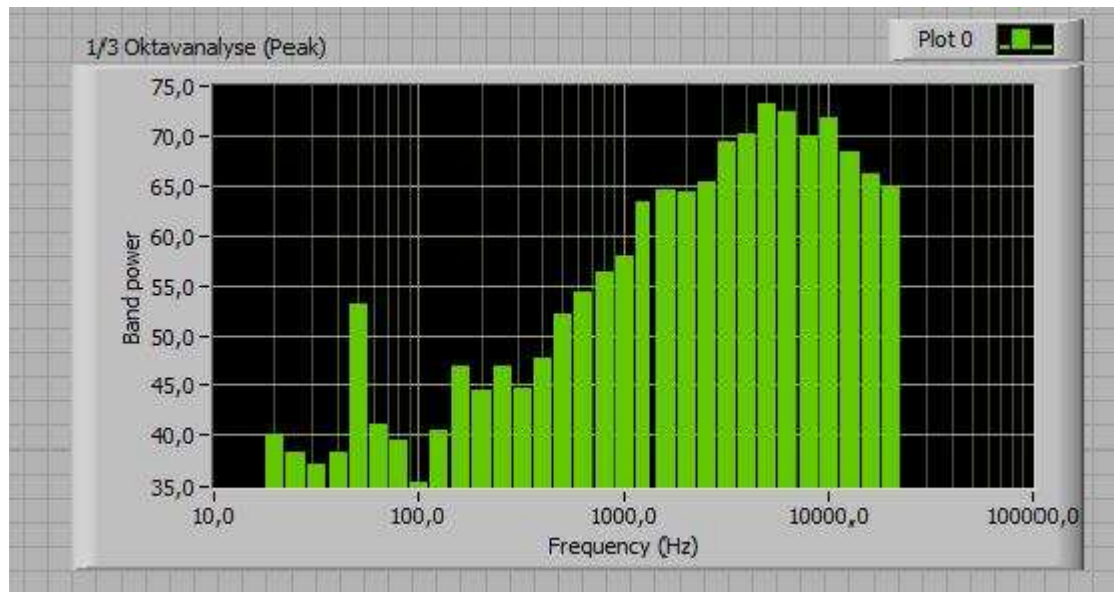


Abb. 75: Terzanalyse Spielzeugpistole Rocky

3. Spielzeugpistole R8, Munition: USA

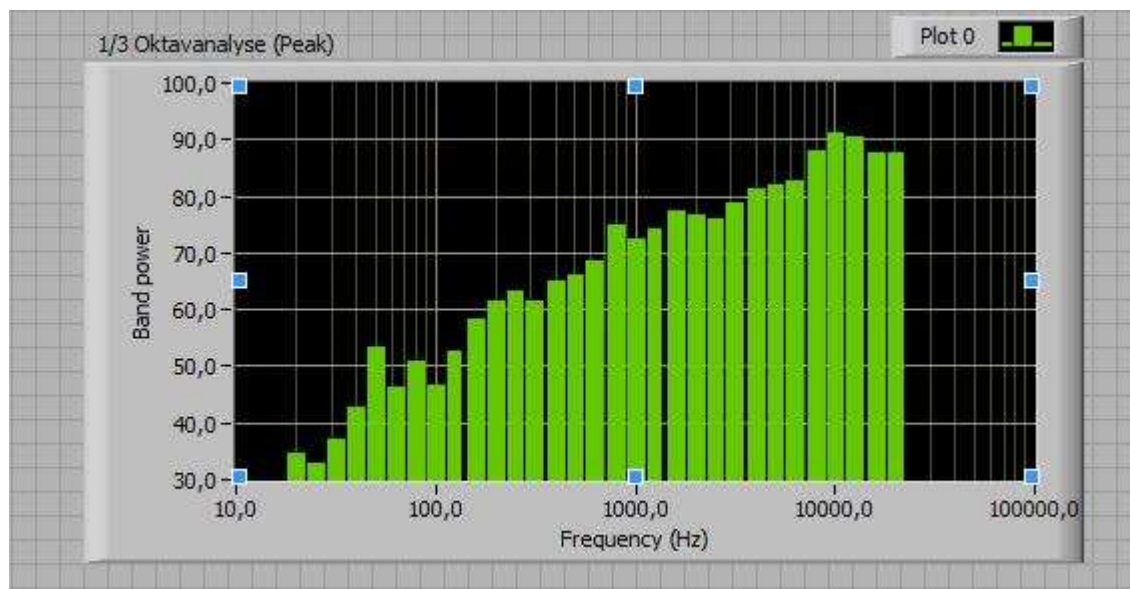


Abb. 76: Terzanalyse Spielzeugpistole R8, USA

Die Frequenzcharakteristik der Spielzeugpistolen ist sehr ähnlich. Alle besitzen einen größeren hochfrequenten Anteil. Die Bandpower steigt mit steigender Frequenz und nimmt nicht wie bei allen anderen Knallquellen ab ungefähr 10000 Hz wieder ab.

4.3.5 Schreckschusspistole

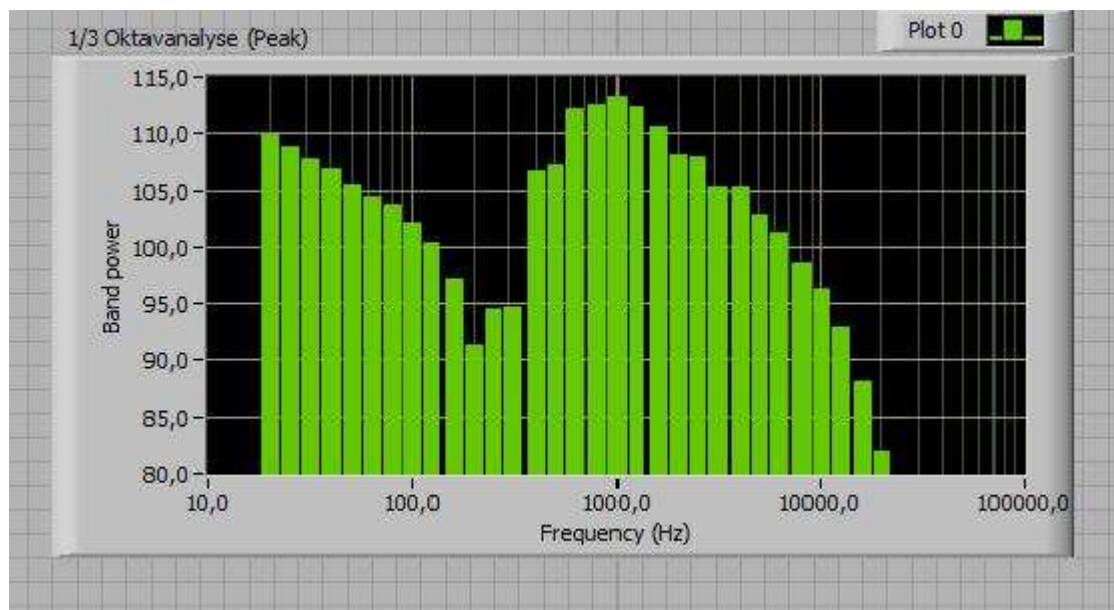


Abb. 78: Terzanalyse Schreckschusspistole

Das Frequenzspektrum der Schreckschusspistole besitzt beim Knall sowohl einen tieffrequenten Anteil zwischen 20 Hz und 100 Hz als auch hochfrequenten Anteil zwischen 600 Hz und 8000 Hz. Im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 600 Hz nimmt die Bandpower ab und steigt ab 600 Hz wieder an.

5 Diskussion

5.1 Der Spitzenpegel

Der Spitzenpegel wurde im Vorfeld als das entscheidende Kriterium für eine Aussage über die Reproduzierbarkeit einer Knallquelle festgelegt: ein Knall ist im Idealfall reproduzierbar mit einer Abweichung von ± 1 dB in Bezug auf den Spitzenschalldruckpegel. Außerdem soll er bei unterschiedlichen Einfallswinkeln und Abständen zum Mikrofon ein konstantes Ergebnis liefern.

In dieser Arbeit interessiert weniger der Wert des Spitzenpegels, sondern es interessiert nach mehrmaliger Messwiederholung die Konstanz der Ergebnisse und somit die Standardabweichung.

5.1.1 Klappe schwarz vs. Klappe hell

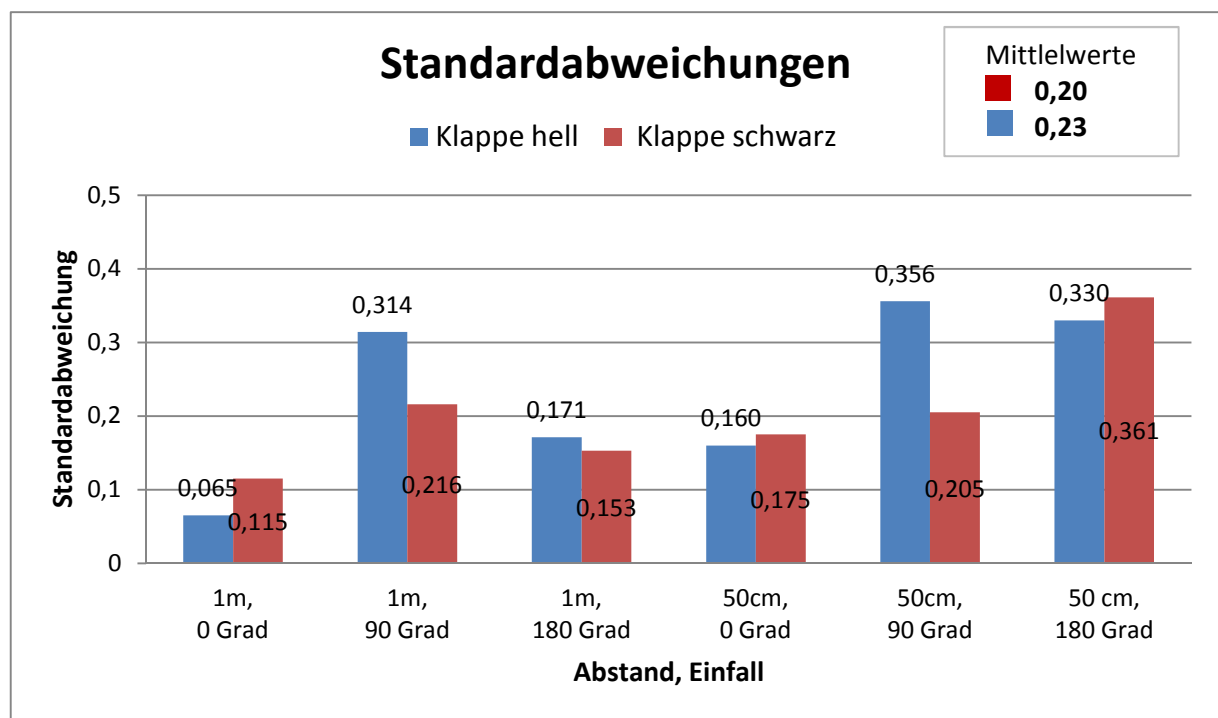


Abb. 77: Standardabweichungen Spitzenpegel, Klappe schwarz vs. Klappe hell

In Bezug auf die Reproduzierbarkeit des Spitzenpegels sind sowohl helle als auch schwarze Klappe repräsentativ. Beide Knallquellen weisen geringe Standardabweichungen auf. Die Mittelwerte der Standardabweichungen sind bei der hellen Klappe 0,23 und bei der schwarzen Klappe 0,20. Die schwarze Klappe ist somit nach mehrmaliger Messwiederholung unter ver-

schiedenen Einfallswinkeln und Abständen reproduzierbarer, wobei der Unterschied zur hellen Klappe mit 0,03 sehr gering ist.

Dieses sehr gute Ergebnis in Bezug auf die Reproduzierbarkeit der Knallquellen lässt sich damit erklären, dass beide Referenzquellen aufgrund ihrer vorgegebenen, nichtveränderbaren Konstruktion bei Betätigung knallen und dabei ein konstantes Ergebnis der entscheidenden Parameter liefern. Auch in anderer Messumgebung liefern helle als auch schwarze Klappe reproduzierbare Ergebnisse. Somit erfüllen die helle als auch die schwarze Klappe die im Vorfeld festgelegten Bedingungen in Bezug auf die Reproduzierbarkeit.

Tabelle 7: Mittelwert aller Mittelwerte der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Klappe schwarz vs. Klappe hell

	Klappe schwarz	Klappe hell
Mittelwert aller Mittelwerte der Spitzenpegel (LCpeak)	134,0 dB	124,5 dB

Die schwarze Klappe ist mit einem Mittelwert aller Mittelwerte in verschiedenen Abständen und Einfallswinkeln mit 134,0 dB (LCpeak) lauter als die helle Klappe mit einem Mittelwert von 124,5 dB (LCpeak). Dies ist mit dem Gewicht der Klappen zu erklären. Die schwarze Klappe ist schwerer als die helle Klappe. Bei der Messung der Klappen wurde darauf geachtet, dass die Klappen ab einem bestimmten Winkel „von alleine“ fallen, und nicht manuell von der ausführenden Person zusammengeklappt werden muss, sodass das Zusammenfallen der Klappe unabhängig von der Stärke des Zusammenklappens ist. Da die schwarze Klappe schwerer ist, fällt diese schneller und ein größeres Gewicht fällt auf die Gegenseite.

Eventuelle Fehler bei der Messung der Klappen können entstehen, wenn man die Klappen nicht „von alleine“ fallen lässt und somit den Fall beeinflusst, indem man bei Zusammenklappen mehr oder weniger Kraft verwendet. Deshalb wurde vor der Messung der Winkel ermittelt, ab dem die Klappen „von alleine“ fallen.

5.1.2 Klicker schwarz und Schreckschusspistole

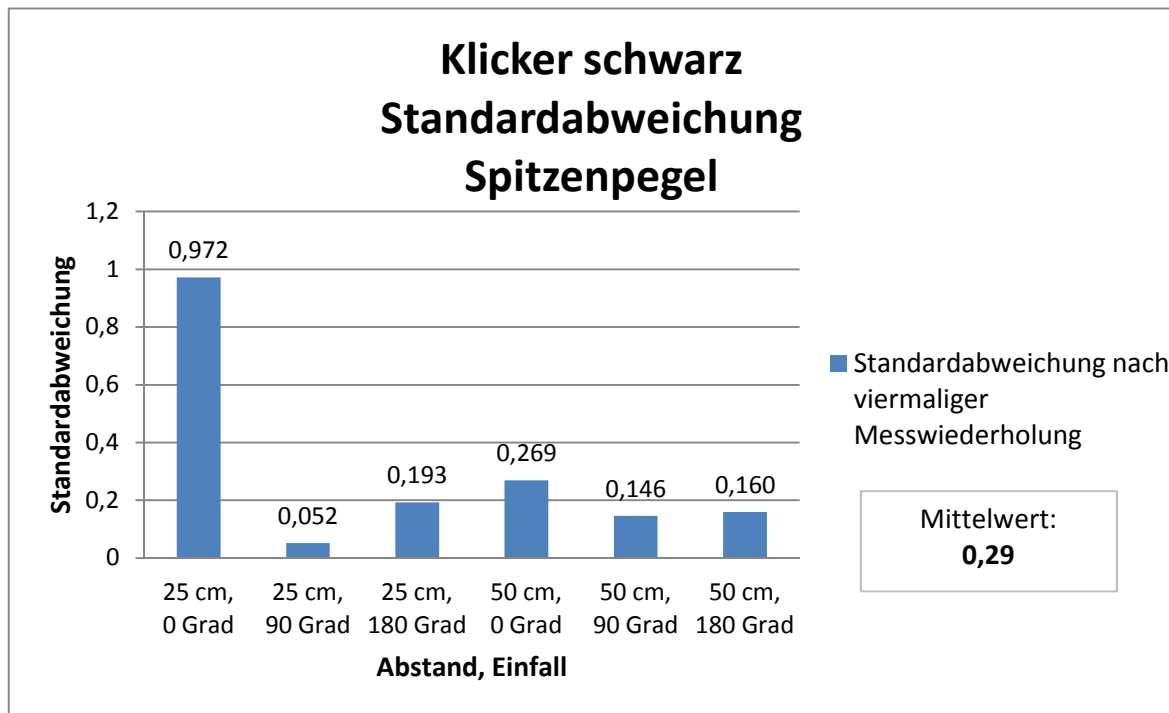


Abb. 78: Klicker schwarz, Standardabweichung Spitzenpegel

Der schwarze Klicker hat sich neben den anderen drei Klickern als der reproduzierbarste herausgestellt. Die Ergebnisse der Messungen mit unterschiedlichen Abständen und Einfallswinkeln liefern ein reproduzierbares Ergebnis. Der Mittelwert der Standardabweichungen beträgt 0,29. Nun stellt sich die Frage, warum der schwarze Klicker reproduzierbare Ergebnisse liefert als die anderen Klicker. Die Bauweise aller drei Klicker ist verschieden, doch das Prinzip des „Klickens“ ist das Gleiche: ein geprägter Stahlblechstreifen ist in ein Plastikgehäuse montiert und beim Biegen dieses Bleches (Betätigen des Druckknopfes) verursacht er einen Knall. Beim schwarzen Klicker fällt auf, dass sich der Druckknopf im Vergleich zu den anderen Druckknöpfen weniger stark nach unten drücken lässt und somit der Weg kürzer ist. Es kann vermutet werden, dass die Fehler und Abweichungen, die auf dem Weg des Herunterdrückens entstehen demnach weniger sind. Das Problem der Klicker allgemein ist, dass die Knallcharakteristika abhängig von der Stärke des Herunterdrückens sind und je nach Betätigung unterschiedlich sind. Das Ergebnis des schwarzen Klickers ist dennoch sehr repräsentativ und erfüllt die Bedingungen einer reproduzierbaren Knallquelle und ist somit als Referenzquelle geeignet.

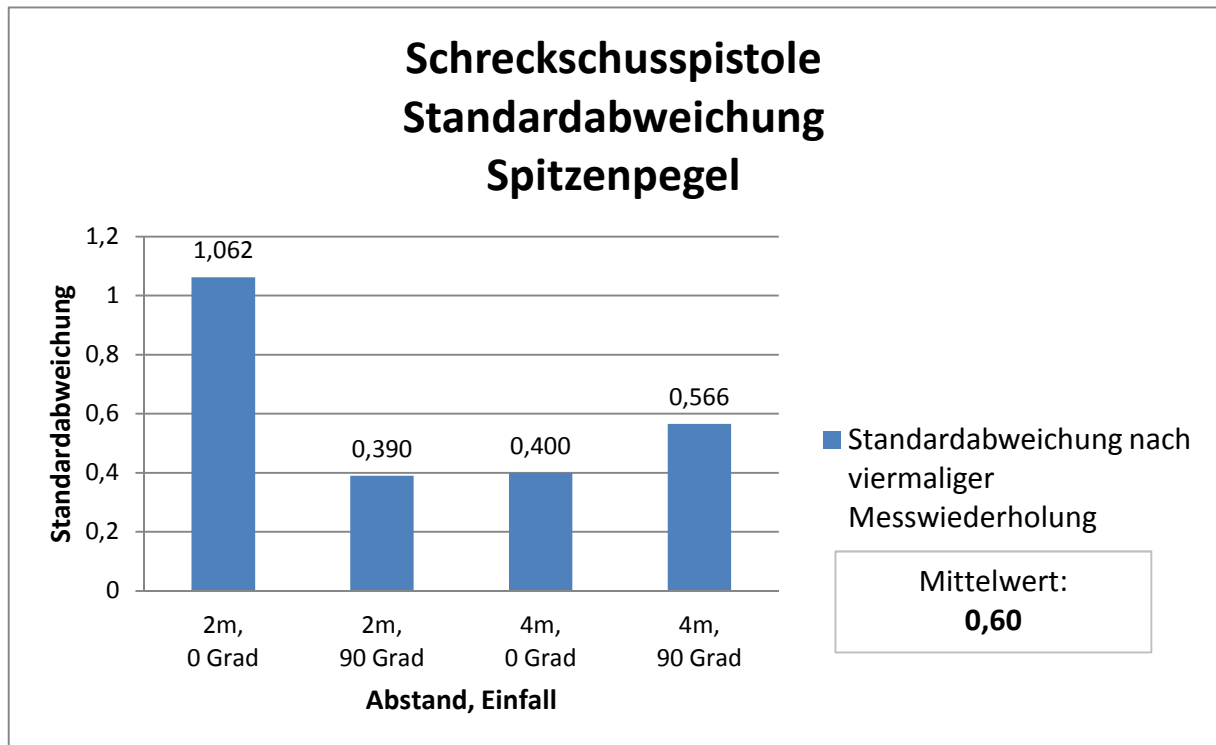


Abb. 79: Schreckschusspistole, Standardabweichung Spitzenpegel

Die Ergebnisse der Schreckschusspistole zeigen ebenfalls, dass die Pistole als reproduzierbare Referenzquelle geeignet ist. Der Mittelwert der Standardabweichungen beträgt 0,60. Dies ist damit zu begründen, dass die Schreckschusspistole bei Betätigung einen Automatismus aufweist, sprich der Ablauf von Abdruck bis zum Knall wird nicht beeinflusst. Ein Problem der Schreckschusspistole als Referenzquelle ist, dass diese nicht in beliebiger Messumgebung gemessen werden kann.

Tabelle 8: Mittelwert der Mittelwerte der Spitze

	Klicker schwarz	Schreckschusspistole
Mittelwert aller Mittelwerte der Spitzenpegel (LCpeak)	111,4 dB	153,1 dB

Der Mittelwert aller Mittelwerte der Spitzenpegel des schwarzen Klickers beträgt 111,4 dB und der Schreckschusspistole 153,1 dB. Die Schreckschusspistole ist damit die lauteste Referenzquelle.

5.1.3 Die Spielzeugpistolen

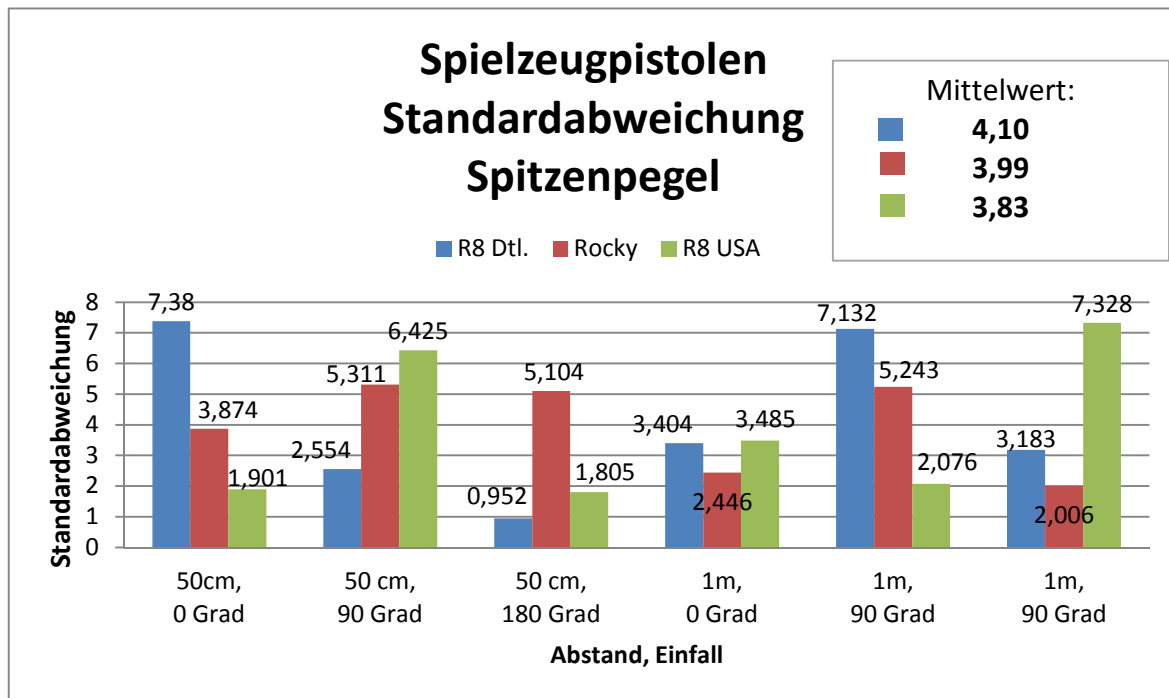


Abb. 80: Spielzeugpistolen, Standardabweichung Spitzenpegel

Die Spielzeugpistolen sind mit Mittelwerten der Standardabweichung von 4,10, 3,00 und 3,83 wenig reproduzierbar. Die Ergebnisse aller drei Spielzeugpistolen variieren nach jeweils 4 Messwiederholungen in verschiedenen Abständen und Einfallswinkeln stark. Dies kann damit begründet werden, dass die Munitionskammern verschieden stark mit Schießpulver behaftet sind. In einer Ringmunition befinden sich 8 Kammern, welche mit Schießpulver gefüllt sind. In der Herstellung dieser Munitionen wird mit so geringen Massen des Schießpulvers gearbeitet, sodass geringste Unterschiede vernachlässigt werden. Je mehr Schießpulver sich in einer Kammer befindet, desto lauter ist der Knall. Aus diesem Grund ist sind die Spielzeugpistolen als reproduzierbare Referenzquelle ungeeignet.

Tabelle 9: Mittelwert aller Mittelwerte der Spitzenpegel bei viermaliger Messwiederholung, Spielzeugpistolen

	R8, Dtl	Rocky	R8, USA
Mittelwert aller Mittelwerte der Spitzenpegel (LCpeak)	121,2 dB	118,5 dB	135,6 dB

5.2 Die Wirkzeit (C- Duration)

Die C- Duration gibt Aufschluss über die Knalldauer und ist somit ein Parameter der Knallcharakteristik.

6.2.1 Klappe schwarz vs. Klappe hell

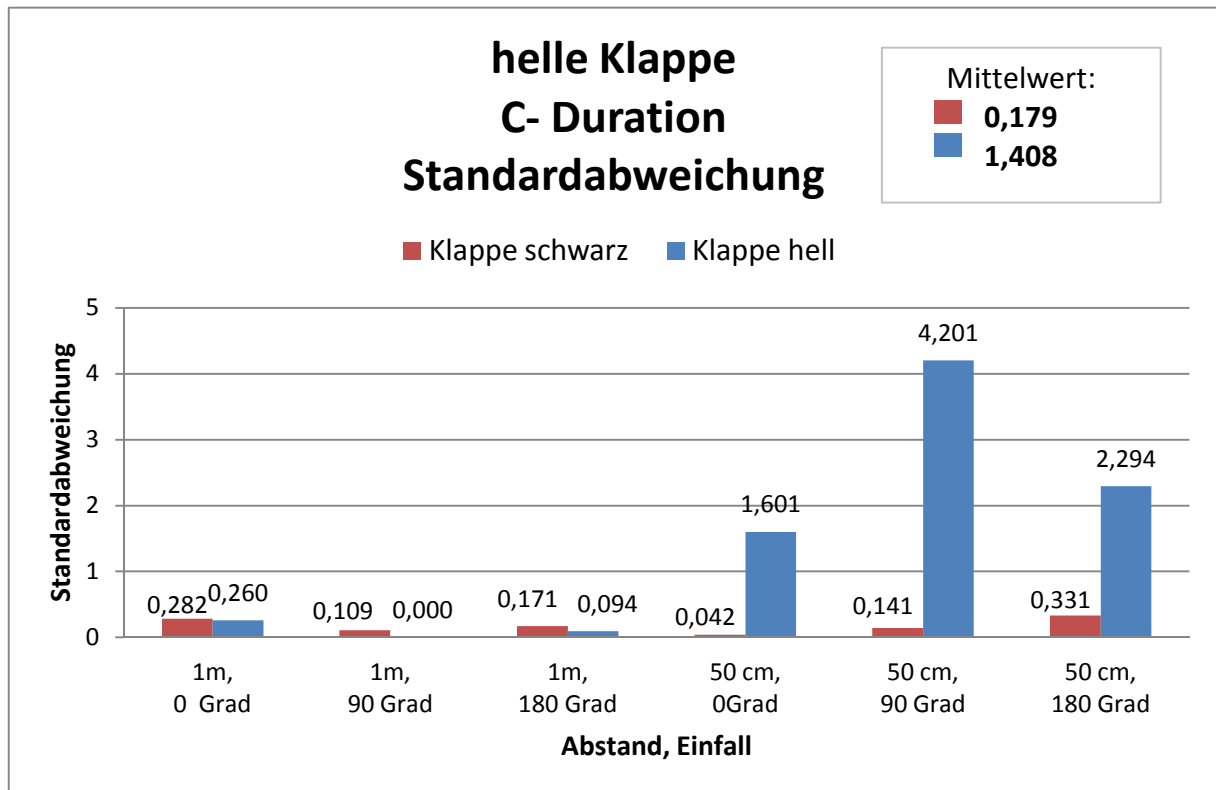


Abb. 81: Klappe schwarz vs. Klappe hell, Standardabweichung

Die Messergebnisse der schwarzen Klappe sind konstanter als die der schwarzen Klappe. Der Mittelwert der Standardabweichungen für die schwarze Klappe beträgt 0,179 und für die helle Klappe 1,408. Somit wäre in Bezug auf die Wirkzeit die schwarze Klappe reproduzierbarer als die helle Klappe. In Bezug auf den Spitzenpegel sind die Klappen mit Mittelwerten der Standardabweichungen von jeweils ungefähr 0,2 gleich.

Die Dauer der Knalle ist in Tabelle 7 dargestellt. Hier ist der Mittelwert aller Mittelwerte in verschiedenen Abständen und Einfallswinkeln aufgezeigt. Dieser beträgt bei der schwarzen Klappe 1,9 ms und bei der hellen Klappe 5,3 ms. Die schwarze Klappe fällt demnach schneller von alleine zu als die helle Klappe.

Das Ergebnis ist damit zu erklären, dass die schwarze Klappe schwerer ist als die helle Klappe und somit schneller von alleine zuklappt.

Tabelle 10: Mittelwert aller Mittelwerte nach viermaliger Messwiederholung der C-Duration, Klappe schwarz vs. Klappe hell

	Klappe schwarz	Klappe hell
Mittelwert aller Mittelwerte der C-Duration	1,9 ms	5,3ms

6.2.2 Klicker schwarz und Schreckschusspistole

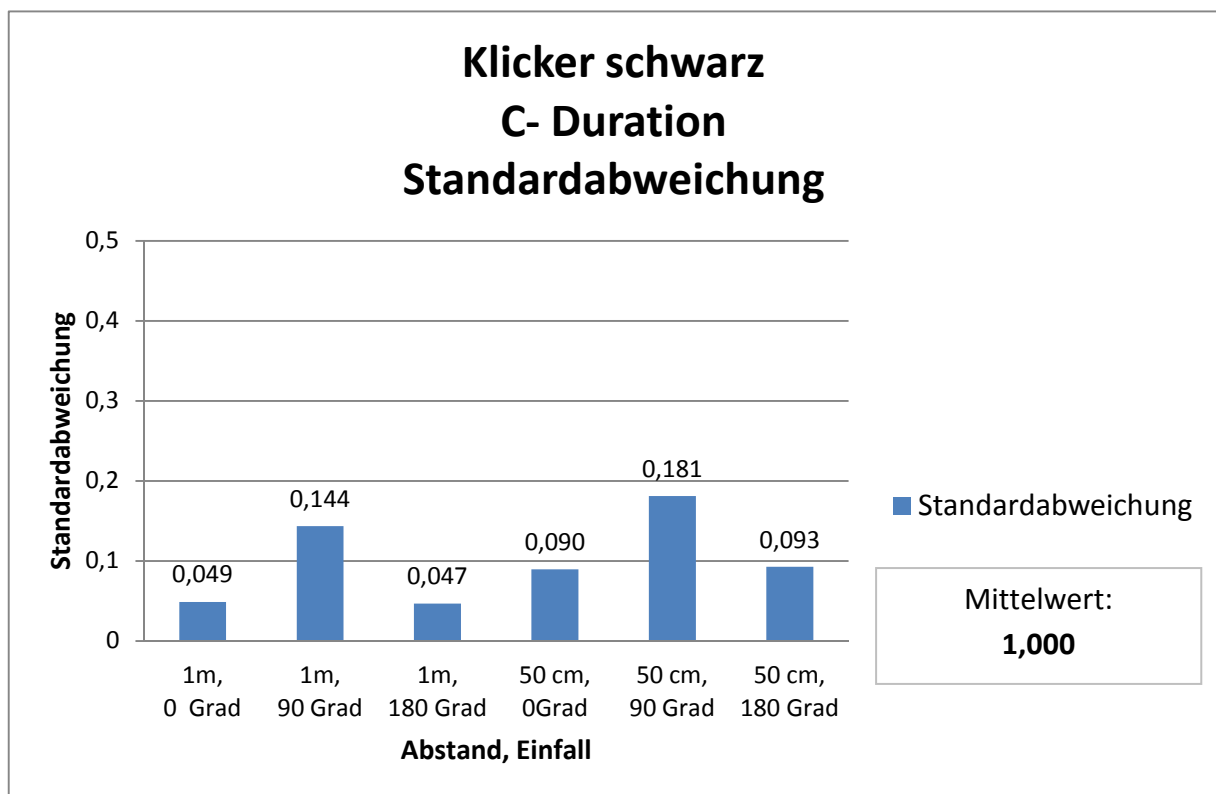


Abb. 82: Klicker Schwarz, Standardabweichung C-Duration

Die Standardabweichungen des schwarzen Klickers bei der Messung der C-Duration variieren mit einem Mittelwert von 1,0. Die Knalldauer des Klickers ist somit nicht immer konstant. Eventuelle Fehler, die hier auftreten können sind, dass der Klicker durch seine Bauart mit dem geprägtem Stahlblechstreifen beim Biegen(Herunterdrücken) des Bleches (Betätigen des Druckknopfes) einen Knall verursacht. Lässt man den Druckknopf des Klickers los, biegt sich das Bleck automatisch in seine Ausgangsposition und verursacht erneut einen Knall, der ein bisschen anders klingt und demnach auch andere Knallcharakteristika wie die Wirkzeit auf-

weist. Bei den Messungen des Klickers wurde darauf geachtet, den „Knall des Herunterdrückens“ aufzunehmen.

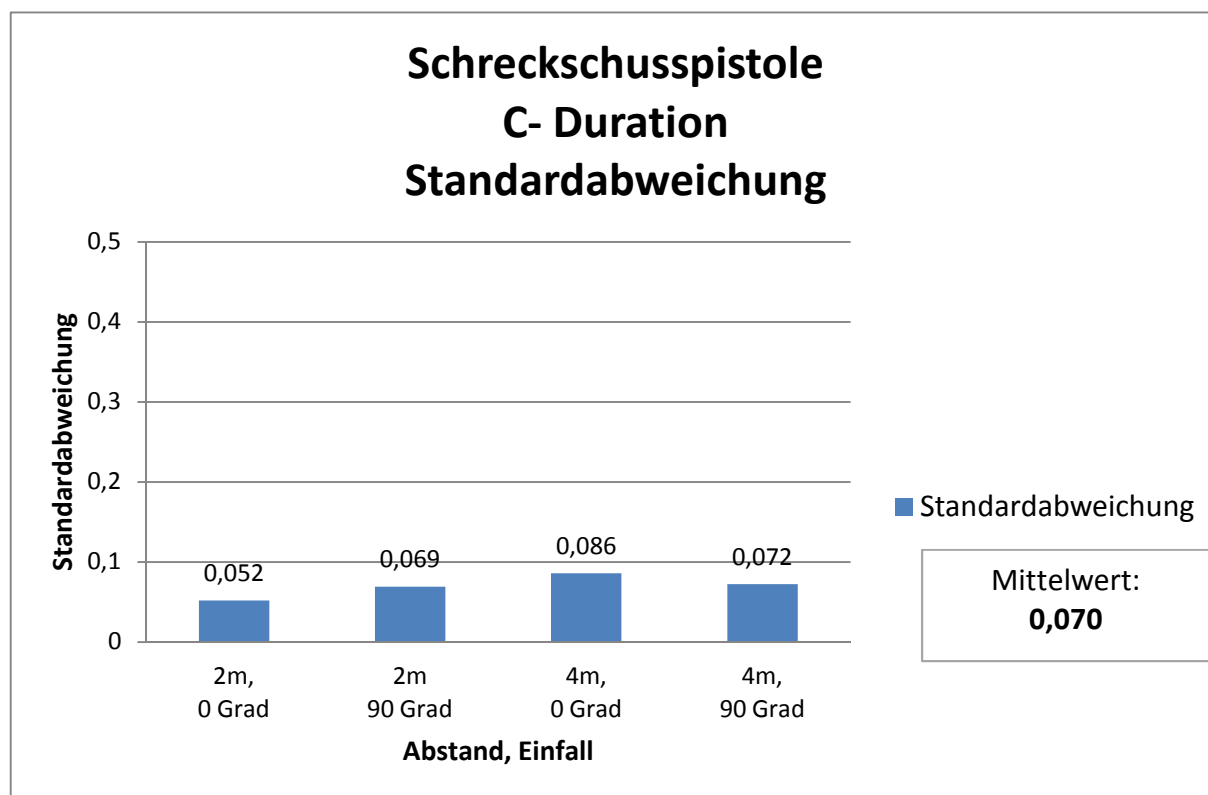


Abb. 83: Schreckschusspistole, Standardabweichung C-Duration

Tabelle 11: Mittelwert aller Mittelwerte der C-Duration nach viermaliger Messwiederholung, Klicker schwarz und Schreckschusspistole

	Klicker schwarz	Schreckschusspistole
Mittelwert aller Mittelwerte der C- Duration	0,7 ms	0,6 ms

5.2.1 Die Spielzeugpistolen

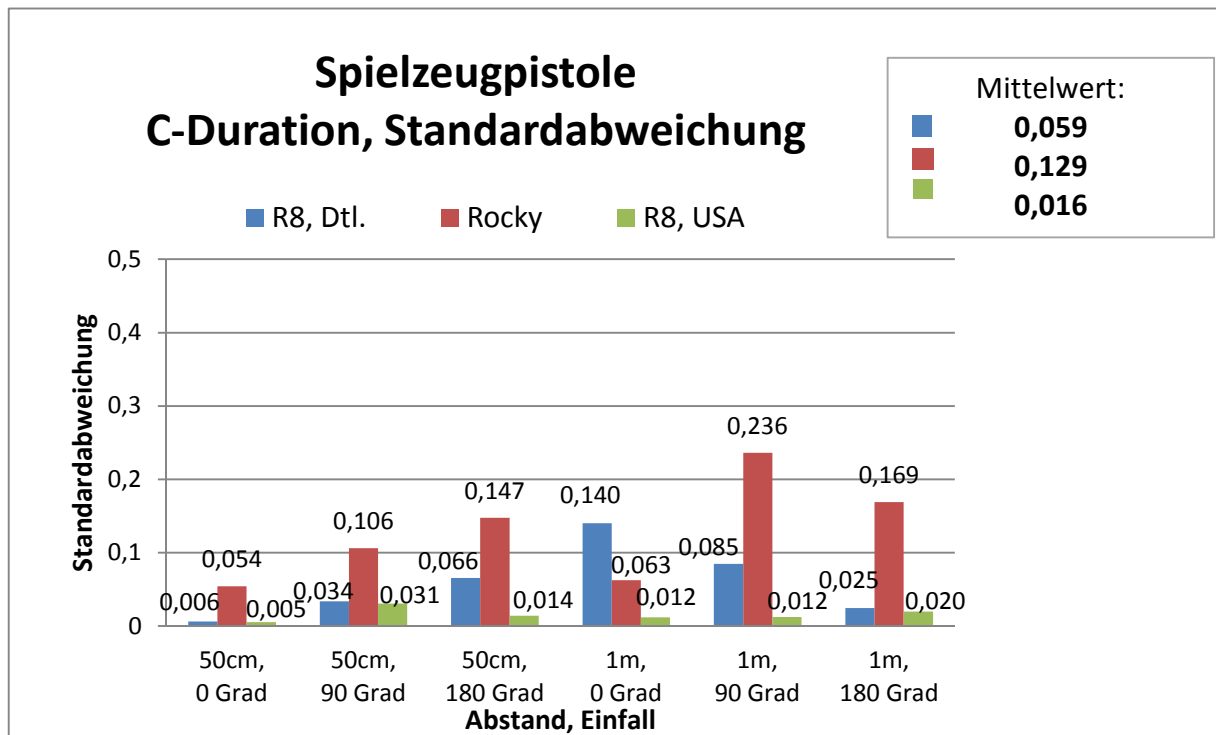


Abb. 84: Spielzeugpistole, Standardabweichung C- Duration

Im Gegensatz zur Reproduzierbarkeit des Spitzenpegels sind die Spielzeugpistolen in Bezug auf die Wirkzeit mit Mittelwerten der Standardabweichungen zwischen 0,016 und 0,129 sehr gering und damit reproduzierbar. Der Knallablauf unterliegt bei Spielzeugpistolen einem unveränderlichen Automatismus und ist unabhängig von der Menge der Munition pro Kammer. Die Wirkzeiten sind mit Werten zwischen 0,1 und 0,2 ms sehr gering.

Tabelle 12: Mittelwert aller Mittelwerte der C-Duration nach viermaliger Messwiederholung, Spielzeugpistolen

	R8, Dtl.	Rocky	R8, USA
Mittelwert aller Mittelwerte der C-Duration	0,1 ms	0,2 ms	0,1 ms

5.3 Die Frequenzanalyse

6.3.1 Klappe schwarz vs. Klappe hell

Das Ergebnis der Terzanalyse der beiden Klappen hat zunächst erstaunt, da die schwarze Klappe bei der Messung subjektiv als „dunkler“ klingend empfunden wurde. Das Ergebnis ist allerdings, dass die schwarze Klappe weniger tieffrequente Anteile besitzt, das Hauptfrequenzspektrum liegt zwischen 500 Hz und 8000 Hz.

Die helle Klappe besitzt beim Knall sowohl einen hochfrequenten als auch einen tieffrequenten Anteil. Die Frequenzcharakteristik ist somit breitbandiger als die der schwarzen Klappe.

Die unterschiedliche Frequenzcharakteristik der Klappen ist mit dem jeweiligem Material zu erklären. Die schwarze Klappe besteht aus Kunststoff, Polyoxymethylen (POM) und die helle Klappe besteht aus Holz.

5.3.2 Klicker schwarz und Schreckschusspistole

Die Frequenzcharakteristik des schwarzen Klickers weist einen größeren hochfrequenten Anteil auf. Das Hauptfrequenzspektrum liegt zwischen 2000 Hz und 10000 Hz. Die eigentliche Knallquelle des Klickers ist ein Blech, das beim Biegen knallt. Dies erklärt den größeren hochfrequenten Anteil bei der Terzanalyse.

Die Schreckschusspistole zeigt in der Frequenzanalyse sowohl einen tieffrequenten Anteil zwischen 20 Hz und 100 Hz als auch hochfrequenten Anteil zwischen 600 Hz und 8000 Hz. Im Frequenzbereich zwischen 100 Hz und 600 Hz nimmt die Bandpower ab und steigt ab 600 Hz wieder an. Das Frequenzspektrum der Schreckschusspistole ist somit breitbandig.

5.3.3 Spielzeugpistolen

Die Frequenzcharakteristik der Spielzeugpistolen ist sehr ähnlich. Alle besitzen einen größeren hochfrequenten Anteil. Die Bandpower steigt mit steigender Frequenz und nimmt nicht wie bei allen anderen Knallquellen ab ungefähr 10000 Hz wieder ab.

5.3.4 Zusammenhang Frequenzcharakteristik mit Spitzenpegel und C-Duration

Tabelle 13: Überblick aller Ergebnisse, Zusammenhang Spitzenpegel, C-Duration und Frequenzcharakteristik

	Klappe schwarz	Klappe hell	Klicker schwarz	Schreck- schusspistole	Spielzeugpis- tolen
Standardab- weichung Spitzenpegel (LCpeak)	0,20	0,23	0,29	0,60	4,0
Standardab- weichung C- Duration	0,18	1,40	1,00	0,07	0,06
Mittelwert Spitzenpegel (LCpeak)	134,0 dB	124,5 dB	111,4 dB	153,1 dB	125,4 dB
Mittelwert C- Duration	1,9 ms	5,3 ms	0,7 ms	0,6 ms	0,13 ms
Frequen- charakteristik	Größerer hochfrequenter Anteil	breitbandig	Größerer hochfrequenter Anteil	breitbandig	Größerer hochfrequenter Anteil

Tabelle 13 zeigt einen Überblick aller zusammengefassten Ergebnisse der Spitzenpegel, C-Duration und die Frequenzcharakteristik. Es stellt sich die Frage, ob die Frequenzcharakteristik mit den gemessenen Parametern in Verbindung steht. Es lässt sich allerdings kein Zusammenhang sehen.

Die Schreckschusspistole und die helle Klappe sind in Bezug auf die Frequenzcharakteristik beide breitbandiger, allerdings lässt sich kein Zusammenhang zwischen den Knallquellen feststellen. Die Schreckschusspistole ist mit 153,1 dB (LCpeak) die lauteste Quelle und die helle Klappe ist mit 124,5 dB im Mittelmaß der Referenzquellen. Auch die Wirkzeiten beider Knallquellen sind unterschiedlich: die Wirkzeit der hellen Klappe beträgt im Durchschnitt 5,3ms und die der Schreckschusspistole 0,6 ms. Beide Referenzquellen sind in Bezug auf den Spitzenpegel, als auch in Bezug auf die Wirkzeit reproduzierbar. Die helle Klappe ist in Bezug auf den Spitzenpegel reproduzierbarer und die Schreckschusspistole ist in Bezug auf die Wirkzeit reproduzierbarer.

Zwischen schwarzer Klappe, schwarzer Klicker und Spielzeugpistolen lässt sich ebenfalls kein eindeutiger Zusammenhang erkennen. Die schwarze Klappe und der Klicker sind in Bezug auf den Spitzenpegel sehr reproduzierbar, die Spielzeugpistolen nicht. Dafür sind diese in Bezug auf die Wirkzeit reproduzierbarer als die schwarze Klappe und der Klicker. Die Mittelwerte der Spitzenpegel sind mit 134,0dB, 111,4dB und 125,4dB relativ verschieden und die Mittelwerte der C-Duration mit den Werten von 1,9 ms, 0,7 ms 0,13ms weichen ebenfalls stark voneinander ab.

Somit lässt sich unter den gemessenen Parametern kein Zusammenhang erkennen.

6 Fazit

Ziel dieser Arbeit ist es, Impulsschallquellen zu identifizieren, die reproduzierbare Testsignale mit unterschiedlicher Pegel- und Zeitcharakteristik liefern. Im Vorfeld dieser Arbeit wurde Reproduzierbarkeit folgendermaßen festgelegt:

Ein Knall ist reproduzierbar mit einer Abweichung von $\pm 1\text{dB}$ in Bezug auf den Spitzenschalldruckpegel. Außerdem soll er bei unterschiedlichen Einfallswinkeln und Abständen zum Mikrofon ein konstantes Ergebnis liefern

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass in Bezug auf den Spitzenpegel folgende reproduzierbare Referenzquellen geeignet sind: Klappe schwarz, Klappe hell, Klicker schwarz und Schreckschusspistole.

Tabelle 14: Überblick aller reproduzierbaren Referenzquellen

	Klappe schwarz	Klappe hell	Klicker schwarz	Schreck- schusspistole
Standardabweichung Spitzenpegel (LCpeak)	0,20	0,23	0,29	0,60

In Tabelle 14 ist ein Überblick dieser reproduzierbaren Referenzquellen dargestellt. Entscheidend sind hier die Standardabweichungen der Spitzenpegel nach viermaliger Messwiederholung.

Für die praktische Anwendung sind alle vier Referenzquellen gut geeignet. Sie sind einfach in der Handhabung und aufgrund ihrer unveränderlichen Konstruktionen sind sie beim Knallen unabhängig von der ausführenden Person. Die Klappen sind aufgrund ihrer Vorrichtung unhandlich und schwer, was allerdings in dieser Arbeit kein Problem dargestellt hat. Für weitere praktische Anwendungen, vor allem im Rahmen des Dosimeterprojektes, muss dies eventuell berücksichtigt werden.

7 Literaturverzeichnis

Acoustical Society of America (2006). American National Standard, Methods for Measurement of Impulse Noise. New York: American Institute of Physics.

Benyoucef, D., Mescheder, U., & Hoffmann, E. (2009). *Miniaturisiertes Impulslärm-Dosimeter zur Untersuchung*.

Buck, K. (2008). Impulse Noise Measurements. (F. G. Louis, Hrsg.) Saint Louis, Frankreich.

Buck, K., & Brengard, V. (1995). *Die digitale Erfassung und Auswertung von Impulslärm R 105/95*. Saint Louis: Deutsch Französisches Forschungsinstitut Saint- Louis.

Georgi, Wolfgang; Metin, Ergun (2009): Einführung in LabVIEW. Mit 146 Aufgaben ; [Studentenversion inklusive]. 4., neu bearb. Aufl... München: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl.

Görne, Thomas (2006): Tontechnik. [Schwingungen und Wellen Hören Schallwandler Impulsantwort Faltung Sigma-Delta-Wandler Stereo Surround WFS Regiegeräte tontechnische Praxis]. München, Wien: Fachbuchverl. Leipzig im Carl-Hanser-Verl.

Henn, Hermann; Sinambari, Gh Reza; Fallen, Manfred (2008): Ingenieurakustik. Physikalische Grundlagen und Anwendungsbeispiele: Vieweg & Teubner.

iSEMcon GmbH. Mikrofon EMM-13D082/H-CCP/B-T Datenblatt.

Liedtke, M. (3. Februar 2010). Akute Gehörschäden durch extrem hohe Schalldruckpegel. *HNO* 58 , S. 106-109.

Leupold, Stefan; Emmert, Bernhard (1988): Mögliche Gehörschäden durch Tieffluglärm. Abschlußdatum: 31.07.1987 ; Contract UFOPLAN 10501213-04. Spreng, Manfred (Hg.). Berlin (Forschungsbericht).

National Instruments: LabVIEW. Version 2010.

Pfander, Friedrich (1994): Das Schalltrauma. Bonn: Bundesministerium der Verteidigung Referat Hygiene Arbeits- Umweltmedizin (Schriftenreihe Präventivmedizin - PM, PM 1).

Research and Technology Organization.: Damage risk from impulse noise. Material assembled to support a lecture series under the sponsorship of the Human Factors and Medicine Panel (HFM) and the Consultant and Exchange Programme of RTO presented on 5 - 6 Jun 2000 in Maryland, USA and on 15 - 16 June 2000 in Meppen, Germany = (Les risques auditifs et extra auditifs des bruits impulsifs). [Elektronische Ressource] (2000). Neuilly-sur-Seine: Research and Technology Organization (RTO lecture series, 219).

Rieländer, Michael M. (1982): Reallexikon der Akustik. Frankfurt am M. Bochinsky.

van de Weyer, P., Praetorius, M., & Tisch, M. (2011). *Update: Knall und Explosionstraumata*. HNO, DOI 10.1007/s00106-011-2352-6, Springer Verlag.

Verein Deutscher Ingenieure (Hrsg.) (1988) VDI 2058 Blatt 2. Beurteilung von Lärm hinsichtlich Gehörgefährdung. Beuth, Berlin

Vorschriften und Richtlinien zur Registrierung und Auswertung von Waffen- und Detonationsknallen. Saint Louis, Bourges, Meppen: ISL, DGA, WTD 91.

Ward, W.D (1968): Proposed Damage- Risk Criterion for Impulse Noise (Gunfire), Report of Working Group 57. National Academy of Sciences – National Research Council, Committee on Hearing, Bioacoustics, and Biomechanics (CHABA).

Wells, Lisa; Travis, Jeffrey (1997): Das LabVIEW-Buch. München: Prentice Hall.

Zenner, H. P.; Struwe, V.; Schuschke, G.; Spreng, M.; Stange, G.; Plath, P. et al. (1999): [Hearing loss caused by leisure noise]. In: HNO, Jg. 47, H. 4, S. 236–248.

8 schriftliche Erklärung

„Ich versichere, dass ich die Thesis selbstständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet habe. Die Arbeit wurde noch keiner Kommission zur Prüfung vorgelegt und verletzt in keiner Weise Rechte Dritter.“

Datum: _____ Unterschrift: _____